

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Комп'ютерних наук і технологій

(повне найменування факультету)

Комп'ютерні системи та мережі

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему СИСТЕМА БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ 802.11АХ НА ПРИКЛАДІ
НАВЧАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ

Виконав: студент 2 курсу, групи КНТ-511м
спеціальності _____

123 «Комп'ютерна інженерія»

Латишев А.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Киричек Г.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Єфименко М.В.

(прізвище та ініціали)

м. Запоріжжя
2022 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет інформатики та радіоелектроніки, комп'ютерних наук і технологій

Кафедра _____ Комп'ютерні системи та мережі _____

Ступінь вищої освіти (освітній ступінь) _____ бакалаврський _____

Спеціальність _____ 123 Комп'ютерна інженерія _____
(код і назва)

Освітня програма (спеціалізація) _____ Комп'ютерні системи та мережі _____
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Кудерметов Р.К.

“ _____ ” _____ 2022 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

Латишева Андрія Вячеславовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Система бездротових мереж 802.11ax на прикладі навчального закладу

керівник проекту (роботи) Киричек Г.Г., канд.техн.наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “07” 11 2022 року № 367

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 12 грудня 2022 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Оцінювання системи бездротових мереж IEEE 802.11ax та експлуатаційних характеристик. Стандарти: 802.11ax. Програмне забезпечення: RouterOS, WinBox, ОС Windows 10, TamoGraph Site Survey. Технології: CAPsMAN. Протоколи: 802.11ax. Обладнання: 14 маршрутизаторів Mikrotik hAP AX3, 1 Керований L2 комутатор FoxGate S6224-S2C2.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз технології IEEE 802.11. Аналіз методики оцінювання пропускної здатності бездротової мережі. Моделювання та налаштування мережі. Дослідження робочих характеристик технології 802.11ax.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Структурна схема реалізації системи;

Інтерфейс пристрою;

Функціональна схема роботи мережі;

Структурна схема мережі;

Результати моделювання приміщення;

Алгоритм (інтерфейси) налаштування мережі.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	Киричек Г.Г., к.т.н., доцент		
Нормоконтроль	Щербак Н.В., ст. викл.		

7. Дата видачі завдання 01.09.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз технології IEEE 802.11	01.09.2022 р.	
2	Аналіз методики оцінювання пропускної здатності бездротової мережі	25.09.2022 р.	
3	Моделювання та налаштування мережі	10.10.2022 р.	
4	Дослідження робочих характеристик технології 802.11ax	20.10.2022 р.	
5	Оформлення отриманих результатів у ПЗ	03.11.2022 р.	
6	Оформлення графічного матеріалу	05.11.2022 р.	
7	Оформлення додаткового матеріалу	07.11.2022 р.	

Студент

(підпис)

А.В. Латишев

(ініціали та прізвище)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Г.Г. Киричек

(ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

83 с., 49 рис., 20 джерел, 6 табл.

IEEE 802.11AX, CAPSMAN, MIKROTIK, WI-FI, WINBOX, IP, MIMO.

Об'єкт дослідження – стандарт IEEE 802.11ax.

Предмет дослідження – система бездротових мереж 802.11ax, характеристики стандарту.

Мета роботи – дослідження стандарту 802.11ax, побудова мережі в навчальному закладі, з метою підвищення рівня інформатизації, надання сучасних послуг, дослідження методом моделювання робочих характеристик, безшовна мережа на базі технології Mikrotik CAPsMAN.

Стандарти: Wi-Fi, 802.11. Програмне забезпечення: RouterOS, WinBox, ОС Windows 10, TamoGraph Site Survey. Технології: CAPsMAN. Протоколи: 802.11a/b/g/n/ac/ax. Обладнання: 14 маршрутизаторів Mikrotik hAP AX3, Керований L2 комутатор FoxGate S6224-S2C2.

Проект складається з чотирьох розділів.

Перший розділ присвячено аналізу технології IEEE 802.11, що включає розвиток бездротових технологій, розбір та характеристики стандартів 802.11.

Другий розділ містить аналіз методики оцінювання пропускної здатності бездротової мережі IEEE 802.11ax.

Третій розділ присвячено налаштуванню мережі, коефіцієнт ослаблення сигналу, план мережі, підключення обладнання, створення безшовної мережі.

У четвертому розділі є дослідження робочих характеристик технології IEEE 802.11ax, налаштування програми TamoGraph та результати моделювання.

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

AP	– Access Point;
CAP	– Controlled Access Point;
DHCP	– Dynamic Host Configuration Protocol;
DNS	– Domain Name System;
IP	– Internet Protocol;
LAN	– Local Area Network;
MAC	– Media Access Control;
WLAN	– Wireless Local Area network;
SSID	– Service Set Identifier;
PoE	– Power over Ethernet;
ПК	– Персональний комп'ютер;
GSM	– Global System for Mobile Communications;
LTE	– Long-Term Evolution;
API	– Application Programming Interface;
DSL	– Domain-Specific Language;
ISO	– International Organization for Standardization;
OSI	– Open Systems Interconnection;
MIMO	– Multiple Input Multiple Output;
MU-MIMO	– Multiple User Multiple Input Multiple Output;
TCP	– Transmission Control Protocol;
UDP	– User Datagram Protocol;
WI-FI	– Wireless Fidelity;
LDPC	– Low-density parity-check code;
QAM	– Quadrature Amplitude Modulation;
SISO	– Single Input Single Output;

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ IEEE 802.11	9
1.1. Розвиток технології бездротових мереж	9
1.2. Стандарт IEEE 802.11 та його характеристики.....	10
1.2.1 Стек протоколів IEEE 802.11	11
1.2.2 Режим розподіленого доступу DCF	11
1.2.3 Централізований режим доступу до PCF	15
1.2.4 Фізичний рівень.....	17
1.2.5 Канальний рівень.....	18
1.2.6 Типи та різновиди з'єднань	20
1.3 Стандарт IEEE 802.11b.....	23
1.4. Стандарт IEEE 802.11a.....	26
1.5. Стандарт IEEE 802.11g.....	30
1.6. Стандарт IEEE 802.11n.....	33
1.7. Стандарт IEEE 802.11ac	36
1.8. Стандарт IEEE 802.11ax.....	41
2. АНАЛІЗ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ БЕЗДРОВОЇ МЕРЕЖІ.....	45
3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА НАЛАШТУВАННЯ МЕРЕЖІ.....	52
3.1. Коефіцієнт ослаблення сигналу Wi-Fi	52
3.2. План мережі	55
3.3. Підготовка до налаштування	59
3.4. Підключення та налаштування	60
3.5. Створення безшовної мережі Wi-Fi	66
4. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГІЇ 802.11AX	68
4.1. Аналіз програмного забезпечення для дослідження	68
4.2. Налаштування програми TamoGraph Site Survey	69
4.3. Результат моделювання	73

ВИСНОВКИ	81
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	82
Перелік графічних матеріалів:	
Креслення 1 – Інтерфейс пристрою	
Креслення 2 – Модель реалізації системи	
Креслення 3 – Результати моделювання приміщення першого поверху	
Креслення 4 – Результати моделювання приміщення другого поверху	
Креслення 5 – Структурна схема мережі	

ВСТУП

Сьогодні бездротові мережі стали невід'ємною частиною нашого повсякденного життя. Вони дозволяють пристроям спілкуватися один з одним без проводів. Це позитивно впливає на багато факторів: мобільність, економічність, економічність тощо. Ноутбуки, смартфони, планшети, телевізори, системи пожежної безпеки – усі пристрої підтримують бездротове підключення.

Популярність бездротових мереж за останні роки спонукала розробників розглянути нові стандарти зв'язку, які пропонують вищу швидкість з'єднання. Отже, якщо швидкість з'єднання, підтримувана бездротовими пристроями, спочатку становила лише 1 і 2 Мбіт/с, цього було явно недостатньо, а тепер максимальна швидкість з'єднання досягла 11 Гбіт/с, що вже може конкурувати з традиційними дротовими мережами. Існує декілька типів бездротових мереж, які відрізняються за покриттям, підтримуваною швидкістю з'єднання та методами кодування даних.

802.11ax – новачок у стандарті, який спрямований на підвищення ефективності мережі для користувачів. З великою кількістю точок доступу та більшою кількістю пристроїв, які підключаються до них, завдання забезпечити прийнятну роботу мережі для кожного пристрою стає важливим і складним.

Розгорнемо безшовну мережу Wi-Fi та проведемо дослідження специфікації 802.11ax на прикладі території навчального закладу, дослідження характеристик специфікації, які можна досягти поточною мережею шляхом моделювання на основі ринку технічного обладнання за останні роки.

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ IEEE 802.11

1.1 Розвиток технології бездротових мереж

У 1990 році комітет стандартів IEEE 802 сформував робочу групу стандартів бездротової локальної мережі 802.11. Група працює над розробкою загальних стандартів для радіообладнання та мереж, що працюють на частоті 2,4 ГГц зі швидкістю доступу 1 і 2 Мбіт/с (мегабіт на секунду). Створення стандарту було завершено через сім років, а перша специфікація 802.11 була ратифікована в червні 1997 року.

Стандарт IEEE 802.11 був першим стандартом для продуктів WLAN від незалежної міжнародної організації, яка розробила більшість стандартів дротових мереж. Однак на той час початкова швидкість передачі даних у бездротовій мережі вже не могла задовольнити потреби користувачів.

Для того, щоб зробити технологію бездротової локальної мережі популярною, доступною і, головне, відповідати суворим вимогам сучасних бізнес-додатків, розробники були змушені створити нові стандарти.

У вересні 1999 року IEEE схвалив розширення попереднього стандарту. Відомий як IEEE 802.11b (також відомий як 802.11 High Speed), він визначає стандарт для бездротових мережевих продуктів, які працюють зі швидкістю 11 Мбіт/с (подібно до Ethernet), що робить ці пристрої успішними у великих організаціях.

Сумісність продуктів від різних виробників гарантується незалежною організацією під назвою Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA). Організація була заснована в 1999 році лідерами в галузі бездротового зв'язку. На сьогодні членами WECA стали понад 80 компаній, серед яких Cisco, Lucent, 3Com, IBM, Intel, Apple, Compaq, Dell, Fujitsu, Siemens, Sony, AMD та інші відомі виробники.

1.2 Стандарт IEEE 802.11 та його характеристики

Усі стандарти IEEE 802.11 працюють на двох нижніх рівнях (фізичному та канальному рівні) моделі ISO/OSI. Будь-яка мережева програма, мережева операційна система або протокол, наприклад TCP/IP, працюватимуть так само добре в мережі 802.11, як і в мережі Ethernet. Комітет IEEE 802 у липні 1997 року ця група випустила стандарт IEEE 802.11 «Контроль доступу до середовища та специфікація фізичного рівня для бездротових локальних мереж» (рис. 1.1). Він визначає архітектуру мережі, принципи для пристроїв для доступу до каналів зв'язку, формати пакетів, методи автентифікації та захист даних.

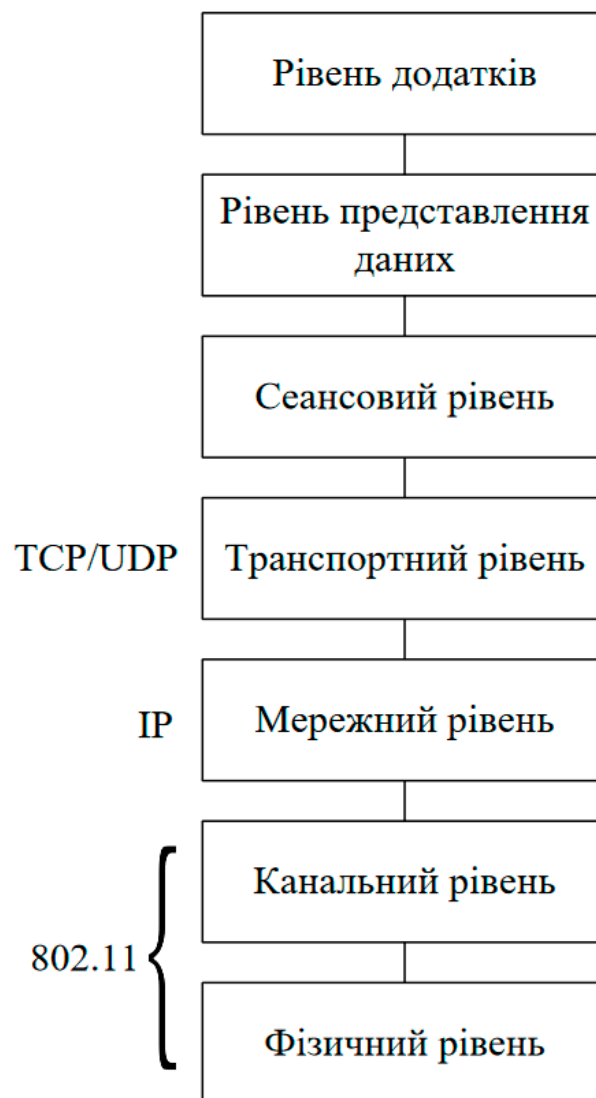


Рисунок 1.1 – Рівні моделі ISO/OSI та її відповідність стандарту 802.11

1.2.1 Стек протоколів IEEE 802.11

Стек протоколів стандарту IEEE 802.11 відповідає загальній структурі стандарту комітету 802, тобто він складається з фізичного рівня та канального рівня з керуванням доступом до середовища MAC (Media Access Control) і LLC (Logical Link Control).) логічні підрівні передачі даних. Як і всі технології сімейства 802, технологія 802.11 визначається двома нижніми рівнями, фізичним рівнем і рівнем MAC, причому рівень LLC виконує стандартні функції, загальні для всіх технологій локальної мережі (рис. 1.2).

На фізичному рівні є кілька варіантів специфікації, які відрізняються використанням діапазоном частот, методом кодування та швидкістю передачі даних. Усі параметри фізичного рівня використовують той самий алгоритм рівня MAC, але деякі таймінги рівня MAC залежать від використовуваного фізичного рівня.

Канальний рівень	LLC					
	MAC	PCF				
		DCF				
Фізичний рівень	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n	802.11ac	802.11ax
	2,4 ГГц DSSS з CCK до 11 Мбіт/с	5 ГГц 64-QAM до 54 Мбіт/с	2,4 ГГц 64-QAM до 54 Мбіт/с	2,4 та 5 ГГц 64-QAM до 600 Мбіт/с	5 ГГц 256-QAM до 6933 Мбіт/с	2,4 та 5 ГГц 1024-QAM до 9608 Мбіт/с

Рисунок 1.2 – Структура стека протоколів IEEE 802.11

1.2.2 Режим розподіленого доступу DCF

Давайте спочатку розглянемо, як забезпечується доступ у розподіленому режимі DCF. У цьому режимі реалізовано множинний доступ із визначенням

несучої з уникненням зіткнень (CSMA/CA). Тут використовується їх непряме виявлення замість прямого виявлення колізій за допомогою підходу CSMA/CD, який є неефективним у бездротових мережах. Для цього кожен переданий кадр повинен бути підтверджений позитивним кадром підтвердження, надісланим станцією призначення. Якщо підтвердження не отримано після вказаного тайм-ауту, станція-відправник вважає, що сталася колізія.

Режим доступу DCF вимагає синхронізації сайту. У специфікації 802.11 ця проблема вирішена досить елегантно - часовий інтервал відраховується з моменту завершення передачі чергового кадру (рис. 1.3). Це не вимагає передачі будь-яких спеціальних сигналів синхронізації, а також не обмежує розмір пакета розміром слота, оскільки слот враховується лише під час прийняття рішення про початок передачі кадру.

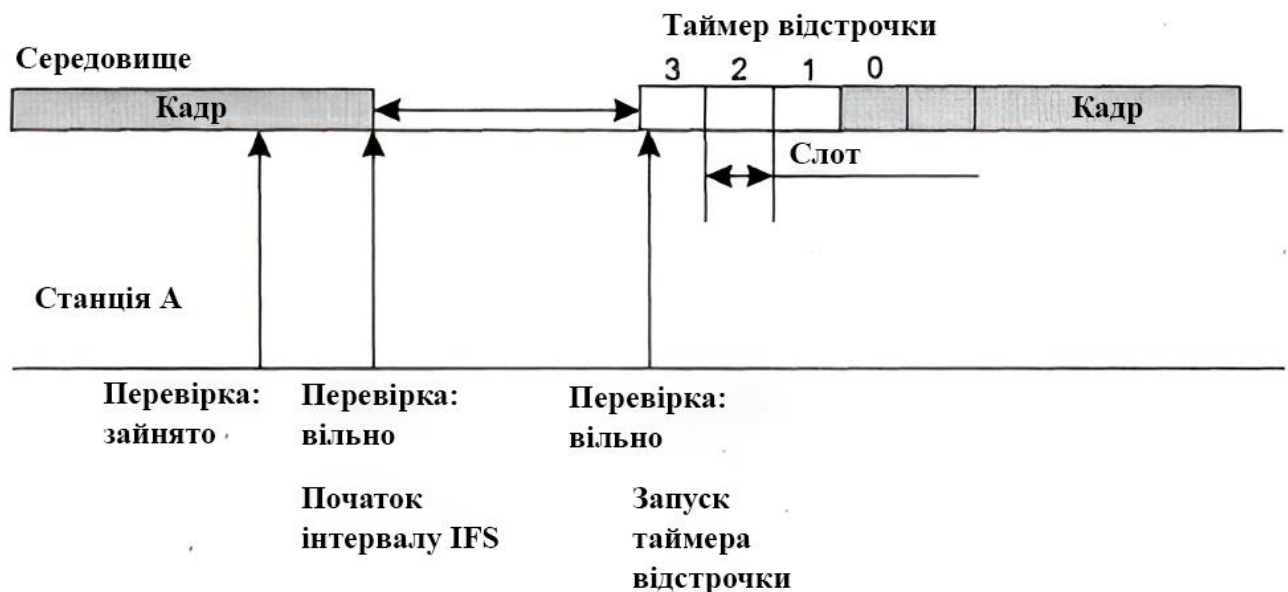


Рисунок 1.3 – Режим доступу DCF

Станція, яка бажає передати кадр, повинна спочатку прослухати носій. Стандарт IEEE 802.11 забезпечує два механізми моніторингу активності в каналі (відчуття несучої): фізичний і віртуальний. Перший механізм реалізований на фізичному рівні і може бути зведений до визначення рівня сигналу в антені та порівняння його з порогом. Механізм визначення віртуальної несучої базується на

тому факті, що передані кадри даних, а також керуючі кадри ACK і RTS/CTS містять інформацію про те, скільки часу потрібно для передачі пакета даних (або набору пакетів даних) і отримання підтвердження. Усі мережеві пристрої отримують інформацію про поточні передачі та можуть визначити, як довго канал буде зайнятий, тобто, коли з'єднання встановлено, пристрій сповіщає всіх, на який час він зарезервував канал. Як тільки станція визначає, що передача кадру завершена, вона повинна обчислити інтервал часу, що дорівнює міжкадровому простору (IFS). Слоти фіксованої довжини враховуються, якщо носій залишається вільним після закінчення терміну дії IFS. Кадри можна передавати лише на початку будь-якого слота, якщо носій вільний. Станція вибирає слоти для передачі на основі усіченого експоненційного двійкового алгоритму відстрочки, подібного до того, що використовується в методі CSMA/CD. Номер слота вибирається як випадкове ціле число, рівномірно розподілене в інтервалі $[0, CW]$, де "CW" означає "Competition Window".

У режимі доступу DCF вживаються заходи щодо усунення прихованих термінальних ефектів. Для цього станція, яка хоче захопити носій і почати передачу кадрів замість кадрів даних у певному часовому інтервалі відповідно до описаного алгоритму, спочатку надсилає короткий службовий кадр RTS (Request to Send) на станцію призначення. Цільова станція повинна відповісти на цей запит службовим кадром CTS (відповідно до надсилання), після чого станція-відправник надсилає кадр даних. Кадр CTS повинен інформувати медіа захоплення тих станцій, які знаходяться поза зоною сигналу станції-відправника, але в межах досяжності станції-одержувача, тобто вони є прихованими терміналами станції-відправника.

Максимальна довжина кадру даних 802.11 становить 2346 байт, максимальна довжина кадру RTS — 20 байт, а максимальна довжина кадру CTS — 14 байт. Оскільки кадри RTS і CTS набагато коротші за кадри даних, колізії кадрів RTS або CTS спричиняють набагато меншу втрату даних, ніж зіткнення кадрів даних. Процес обміну кадрами RTS і CTS необов'язковий. Його можна відкинути при невеликому навантаженні мережі, оскільки в цьому випадку рідко

виникають колізії, а це означає, що не варто витрачати додатковий час на виконання процесу обміну кадрами RTS і CTS.

Іноді буває, що великі кадри даних втрачаються через перешкоди, тому ви можете зменшити довжину цих кадрів шляхом фрагментації. Сегментація кадру — це функція, яка виконується на рівні MAC для підвищення надійності передачі кадру через бездротове середовище. Фрагментація означає розбиття кадру на менші частини та передачу кожної частини окремо (рис. 1.4).

Припустимо, що ймовірність успішної передачі менших фрагментів вища в шумному бездротовому середовищі. Кожен фрагмент кадру підтверджується окремо; тому, якщо будь-який фрагмент кадру передається з помилкою або конфліктує, потрібно повторно передати лише його, а не весь кадр. Це збільшує пропускну здатність середовища.



Рисунок 1.4 – Фрагментація кадру

Припустимо, що ймовірність успішної передачі менших фрагментів вища в шумному бездротовому середовищі. Кожен фрагмент кадру підтверджується окремо; тому, якщо будь-який фрагмент кадру передається з помилкою або конфліктує, потрібно повторно передати лише його, а не весь кадр. Це збільшує пропускну здатність середовища.

Розмір фрагмента може встановити адміністратор мережі. Фрагментуються лише одно адресні кадри. Широкомовні або групові кадри передаються цілком. Крім того, фрагменти кадру передаються як пакети, використовуючи лише одну ітерацію механізму доступу до медіа DCF.

Хоча фрагментація покращує надійність передачі кадрів у бездротовій локальній мережі, вона додає «накладні витрати» на протокол 802.11 MAC. Кожен фрагмент кадру містить інформацію, що міститься в MAC-заголовку 802.11, і для передачі також потрібен відповідний кадр підтвердження. Це збільшує витрати MAC і погіршує фактичну продуктивність бездротової станції. Фрагментація – це баланс між надійністю та накладними витратами на навколишнє середовище.

1.2.3 Централізований режим доступу до PCF

Якщо в мережі є станції як точки доступу, метод централізованого доступу PCF також можна використовувати для надання послуг пріоритетного трафіку. У цьому випадку точка доступу відіграє роль медіа-арбітра.

Режим доступу PCF і режим DCF співіснують у мережі 802.11. Обидва режими координуються за допомогою трьох типів міжкадрового інтервалу (рисунок 1.5).

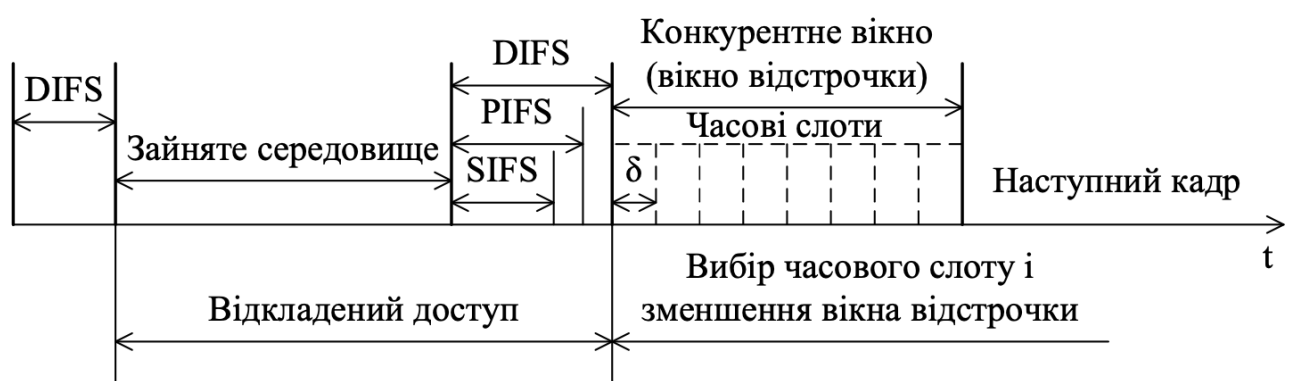


Рисунок 1.5 – Співіснування режимів PCF та DCF

Після випуску середовища кожен сайт відраховує час простою середовища та порівнює його з трьома значеннями:

- короткий міжкадровий простір (Short IFS - SIFS);

- режим міжкадрового інтервалу;
- міжкадровий простір (PCF(PIFS) DI; FS) для режиму DCF.

Захоплення середовища за допомогою розподіленого процесу DCF можливе, лише якщо час простою середовища дорівнює або перевищує DIFS. Тобто інтервал DIFS є найдовшим із трьох можливих періодів і його слід використовувати як IFS у режимі DCF, що робить цей режим найнижчим пріоритетом.

Міжкадровий простір SIFS має мінімальне значення та використовується для встановлення пріоритету захоплення медіа шляхом відповіді на прийом кадру CTS або продовження чи завершення передачі кадру, яка вже почалася.

Значення міжкадрового простору PIFS більше, ніж SIFS, але менше, ніж DIFS. Інтервал часу між завершеннями PIFS і DIFS використовується арбітром медіа. Протягом цього проміжку часу він може надіслати спеціальний кадр, повідомляючи всім станціям, що період моніторингу почався. Після отримання цього кадру станції, які хочуть захопити медіафайли за допомогою алгоритму DCF, більше не можуть цього робити, їм потрібно чекати, поки контрольований період закінчиться. Його тривалість оголошується в спеціальному кадрі, але цей період часу може закінчитися раніше, якщо на сайті немає трафіку, чутливого до затримки. У цьому випадку арбітр відправляє службовий кадр, після чого після закінчення інтервалу DIFS починає працювати режим DCF.

На контрольованій ділянці реалізований метод централізованого доступу PCF. Арбітр виконує процедуру опитування, надаючи кожній такій станції по черзі право використовувати носій, надсилаючи кожній такій станції спеціальний кадр. Станція, отримавши такий кадр, може відповісти іншим кадром, який підтверджує отримання спеціального кадру та одночасно передає дані (на адресу арбітра на зворотному зв'язку або безпосередньо на станцію).

Щоб переконатися, що певні частини медіа завжди надходять до асинхронного трафіку, тривалість періоду моніторингу обмежена. Після завершення арбітр передає відповідний кадр і починається період спостереження.

Кожна станція може працювати в режимі PCF, для чого вона повинна підписатися на цю послугу при підключенні до мережі.

1.2.4 Фізичний рівень

Стандарт IEEE 802.11 визначає передачу сигналу за допомогою одного з двох методів - прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) і стрибкоподібної зміни частоти (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS), які відрізняються модуляцією, але використовують однакову технологію розширення спектру. Основний принцип Технологія розширеного спектру (Spread Spectrum, SS) полягає у переведенні вузькосмугового спектру сигналу, який з'являється під час звичайного потенційного кодування, у широкосмуговий спектр, що може значно підвищити завадостійкість переданих даних. Метод FHSS передбачає зміну несучої частоти сигналу.

Для підвищення завадостійкості необхідно збільшити частотний спектр сигналу передачі, в якому несуча частота змінюється за псевдовипадковим законом, а кожен пакет даних передається зі своєю несучою частотою. При використанні FHSS конструкція трансивера дуже проста, але цей метод підходить лише для ситуації, коли пропускна здатність не перевищує 2 Мбіт/с, тому в IEEE 802.11b додається DSSS. Можна побачити, що тільки пристрої IEEE 802.11, які підтримують DSSS, можуть працювати з пристроями IEEE 802.11b без швидкості передачі, що перевищує максимальну швидкість (2 Мбіт/с) у вузькому місці, тобто пристрої, які використовують старий стандарт і не розширені.

Метод DSSS заснований на принципі фазової маніпуляції (тобто передачі інформації шляхом різких змін початкової фази сигналу). Щоб розширити спектр переданого сигналу, передана інформація перетворюється в так званий код Баркера, який є псевдовипадковою послідовністю. На кожен переданий біт у послідовності Баркера припадає 11 біт. Розрізняють пряму і зворотну послідовності Баркера. Завдяки великій надмірності кодування ймовірність того, що перешкода змінить пряму послідовність Баркера на зворотну послідовність Баркера, близька до нуля.

Прямий код Баркера передає 1 біт, інвертований код передає нульовий біт. Досить вузький «коридор» шириною 83 МГц, розділений на 14 каналів, призначений для бездротових комп'ютерних мереж в діапазоні 2,4 ГГц. Для усунення взаємних перешкод між каналами їх смуги частот повинні бути розділені на 25 МГц.

Простий розрахунок, зона може використовувати лише три канали одночасно. У цьому випадку неможливо вирішити проблему шумопоглинання за допомогою автоматичного перетворення частоти, тому WLAN використовує дуже надлишкові коди. У випадках, коли такі заходи не можуть забезпечити зазначену надійність передачі, швидкість поступово знижується від максимального значення 11 Мбіт/с до одного з наступних фіксованих значень: 5,5; 2; 1 Мбіт/с. Падіння швидкості відбувається не тільки при високому рівні перешкод, але і якщо відстані між елементами бездротової мережі досить великі.

1.2.5 Канальний рівень

Подібно до дротової мережі Ethernet, у бездротовій комп'ютерній мережі Wi-Fi рівень зв'язку включає підрівні Logical Link Control (LLC) і Media Access Control (MAC). Ethernet і IEEE 802.11 використовують ту саму LLC, що полегшує поєднання дротових і бездротових мереж. Два стандарти MAC мають багато спільного, але є і деякі нюанси, важливі при порівнянні дротових і бездротових мереж. В Ethernet, щоб увімкнути множинний доступ до загального середовища передачі (у цьому випадку кабелю), використовується протокол CSMA/CD, який забезпечує виявлення та обробку колізій (у термінах комп'ютерних мереж, коли кілька пристроїв намагаються з'єднатися, це називається ситуацією, коли передача починається одночасно).

Мережі IEEE 802.11 використовують напівдуплексний режим передачі, тобто в будь-який час станція може отримати або передати інформацію, тому виявити колізію під час передачі неможливо. Для IEEE 802.11 була розроблена модифікована версія протоколу CSMA/CD під назвою CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Він працює наступним чином. Станція для передачі інформації спочатку «слухає ефір». Якщо на робочій частоті не

виявлено активності, станція спочатку чекає випадкову кількість часу, потім знову «прослуховує трансляцію» і, якщо носій даних ще вільний, передає.

Випадкова затримка необхідна, щоб мережа не зависла, якщо кілька станцій хочуть отримати доступ до цієї частоти одночасно. Якщо пакет надійшов без спотворень, приймаюча станція повертає підтвердження. Цілісність пакету перевіряється методом контрольної суми. Після отримання підтвердження станція-відправник вважає передачу цього пакета завершеною. Якщо підтвердження не отримано, станція припускає, що сталася колізія, і знову передає пакет через випадковий проміжок часу.

Ще одна проблема, характерна для бездротових мереж, полягає в тому, що дві клієнтські станції погано спілкуються одна з одною, але кожна клієнтська станція має якісне з'єднання з точкою доступу. У цьому випадку транспортний клієнт може надіслати запит до точки доступу для очищення повітря. Потім за командою з точки доступу інші клієнтські станції припиняють передачу під час «спілкування» між двома точками з поганим зв'язком.

Примусовий бездротовий режим (Request to Send/Clear to Send -протоколи RTS/CTS) реалізовано не в усіх моделях пристроїв IEEE 802.11, а якщо він присутній, то вмикається лише в крайніх випадках. В Ethernet при передачі поточкових даних використовується контроль доступу до каналу зв'язку, призначений для всіх станцій. Навпаки, IEEE 802.11 у цьому випадку використовує централізоване керування з точки доступу.

Клієнтські станції запитуються послідовно для передачі поточкових даних. Якщо будь-яка станція вказує, що вона буде передавати поточкові дані, точка доступу призначає їй період часу, протягом якого вона сама передає дані з усіх станцій у мережі. Слід зазначити, що примусове видалення повітря знижує ефективність бездротових мереж, оскільки пов'язане з короткочасними перервами в передачі додаткової службової інформації та зв'язку. Крім того, у дротовій мережі Ethernet, якщо потрібно, можна досягти не лише напівдуплексної, а й повнодуплексної передачі, коли під час передачі виявляються колізії (що збільшує фактичну пропускну здатність мережі). Отже, на жаль, фактична пропускну

здатність бездротової мережі IEEE 802.11b буде нижчою, ніж дротовий Ethernet, за інших рівних умов.

Отже, якщо ви надаєте такій самій кількості користувачів мережу Ethernet 10 Мбіт/с і мережу IEEE 802.11b (максимальна швидкість передачі 11 Мбіт/с) з однаковим навантаженням і поступово збільшуєте навантаження, тоді, починаючи з певного порогу, мережа IEEE 802.11b буде почне "сповільнюватися", Ethernet все одно працюватиме нормально.

Оскільки клієнтами можуть бути мобільні пристрої з автономним живленням, стандарт IEEE 802.11 приділяє велику увагу управлінню живленням. Зокрема, надається режим, коли клієнтська станція "прокидається" через певні проміжки часу для отримання сигналу пробудження, який може бути надісланий точкою доступу. Якщо цей сигнал отримано, клієнтський пристрій вмикається, інакше він знову «засинає» до наступного циклу отримання інформації.

1.2.6 Типи та різновиди з'єднань

Ad-Нос підключення (точка-точка). Усі комп'ютери оснащені бездротовими мережевими картами (клієнтами) і безпосередньо з'єднані один з одним через радіоканал, що працює за стандартом 802.11b і забезпечує швидкість комутації 11 Мбіт/с, що більш ніж достатньо для звичайних інфраструктурних з'єднань. Усі комп'ютери оснащені бездротовими мережевими картами та підключені до точок доступу.

Крім того, він ідеально підходить для організації бюджетних мереж завдяки мінімальній кількості пристроїв. Мережі Ad-Нос характеризуються структурною гнучкістю, швидкістю розгортання, живучістю та мобільністю. Фактична швидкість обміну даними становить $11/N$ Мбіт/с, де N – кількість пристроїв у мережі, а швидкість передачі різко падає зі збільшенням відстані між пристроями (до 100 метрів).

Мінімальна швидкість, необхідна для потокового відеоконтенту в режимі Ad-Нос, за умови, що в радіусі 100 м підключено максимум 3 користувачів.

У свою чергу, він може підключатися до дротової мережі, як показано на рисунку 1.6. Використовуйте цю модель, коли потрібно підключити більше двох

комп'ютерів. Сервер з точкою доступу може виступати в ролі маршрутизатора і самостійно розподіляти канали доступу в Інтернет.

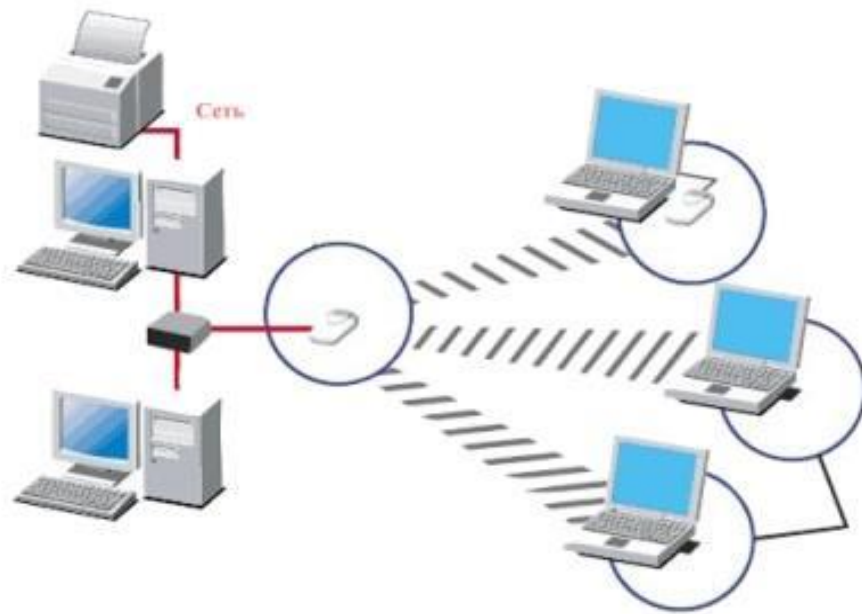


Рисунок 1.6 – Точка доступу та клієнти в мережах 802.11

Точки доступу з використанням маршрутизаторів і модемів.

Точка доступу міститься в роутері, роутер - в модемі (ці пристрої можуть бути об'єднані в два або навіть в один). Тепер кожен комп'ютер із адаптером Wi-Fi у зоні дії Wi-Fi може отримати доступ до Інтернету клієнтський пункт.

На відміну від режиму Ad-Hoc, інфраструктура вимагає додаткового обладнання, а саме точок доступу, які можуть діяти як комутатори або маршрутизатори для встановлення постійних мережевих з'єднань між користувачами та розподілу доступу до Інтернету.

Підключивши кабель Ethernet, точку доступу можна підключити до дротової або гібридної мережі – мережевої інфраструктури. Швидкість обміну даними досягає 54 Мбіт/с, але сигнал Wi-Fi зі слабкою здатністю запобігати перешкодам буде послаблений через проходження через фізичні перешкоди. Проблема завмирання сигналу можна усунути, використовуючи потужну вузьку антену або просто збільшивши потужність точки доступу.

У цьому режимі точка доступу діє як клієнт і може підключатися до точки доступу, що працює в інфраструктурному режимі. Але можна підключити лише одну MAC-адресу. Тут стоїть завдання об'єднати лише два комп'ютери. Два WiFi-адаптери можуть працювати безпосередньо один з одним, не потребуючи центральної антени.

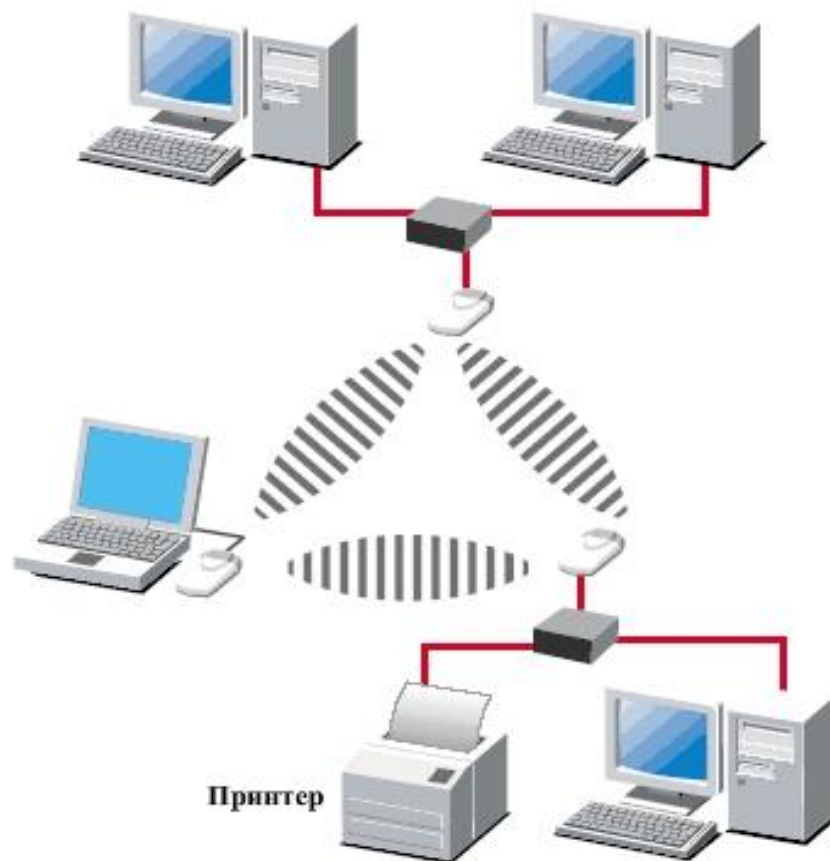


Рисунок 1.7 – Мостове з'єднання

Комп'ютер під'єднано до дротової мережі. Точки доступу підключаються до кожного набору мереж, які з'єднані одна з одною через радіоканали, як показано на рисунку 1.8.

Цей режим призначений для об'єднання двох і більше дротових мереж. Неможливо підключити бездротових клієнтів до точки доступу, що працює в режимі моста.

1.3 Стандарт IEEE 802.11b

Всупереч своїй назві стандарт IEEE 802.11b, прийнятий у 1999 році, не є продовженням стандарту 802.11a, оскільки вони використовують іншу технологію: DSSS (точніше, вдосконалена версія HR-DSSS) у 802.11b є таким же, як OFDM. Цей стандарт визначає використання неліцензованого діапазону 2,4 ГГц. Швидкість передачі до 11 Мбіт/с.

Між дротовими мережами Ethernet і радіочастотними мережами Ethernet багато спільного, але є й багато відмінностей.

Це зрозуміло - різні середовища передачі даних вимагають принципово різних методів передачі даних і кодування, тобто підготовки даних безпосередньо до передачі. Тому основні відмінності між дротовими та бездротовими мережами зосереджені на так званому фізичному підрівні (Physical Layer, PHY) і підрівні доступу (Medium Access Control, MAC) середовища передачі даних. Відповідно до еталонної моделі мережевої взаємодії OSI (Open Systems Interconnection) саме на цих підрівнях дані формуються та правильно кодуються для подальшої передачі в мережі.

Теоретичні аспекти функціональності мережі Radio Ethernet визначаються стандартами IEEE 802.11 і IEEE 802.11b. У цих стандартах організація бездротових мереж визначається на рівні доступу (рівень MAC) і фізичному рівні (рівень PHY) середовища передачі даних.

Спочатку стандарт IEEE 802.11 припускав, що дані можуть передаватися по радіоканалу зі швидкістю 1 Мбіт/с, з можливістю передачі даних зі швидкістю 2 Мбіт/с.

У більш пізній версії - IEEE 802.11b, він фактично доповнив основний стандарт зі швидкістю передачі 1, 2, 5,5 і 11 Мбіт/с. Метод розширеного спектру, який використовується в цій специфікації, є DSSS прямої послідовності.

У таблиці 1.1 наведено основні параметри специфікації 802.11b.

Таблиця 1.1 – Основні параметри специфікації IEEE 802.11b

Параметр	Значення параметру	Метод модуляції
Діапазон частот, МГц	2400...2483,5	
Метод розширення спектру	DSSS	
Швидкість передавання даних в радіоканалі, Мбіт/с	1	DBPSK
	2	DQPSK
	5,5	CCK
	11	CCK
	22	PBCC
Максимальна потужність передавача, дБм	до 20 (100 мВт)	

Враховуючи, що спектральна ширина прямокутного імпульсу обернено пропорційна його тривалості, точніше, $2/T$, легко підрахувати, що при швидкості інформації 1 Мбіт/с частота повторення послідовності окремих чіпів Баркера буде 11 Мчіп/с, а спектральна ширина такого сигналу становитиме 22 МГц, оскільки тривалість одного чіпа $1/11$ мкс.

Швидкість передачі інформації 1 Мбіт/с є обов'язковою у стандарті IEEE 802.11 (базова швидкість доступу), але швидкість передачі 2 Мбіт/с (розширена швидкість доступу) є необов'язковою. Для передачі даних з такою швидкістю також використовується відносна фазова модуляція, але вже квадратурна (DQPSK). Це дозволяє подвоїти швидкість передачі інформації. При цьому ширина самого спектру залишається колишньою і становить 22 МГц.

У стандарті 802.11b, крім 1 і 2 Мбіт / с, обов'язкові швидкості 5,5 і 11 Мбіт / с, на цих швидкостях використовується дещо інший спосіб розширення спектру.

Поточна версія стандарту IEEE 802.11b використовує кілька методів кодування з використанням комплементарного коду (CCK).

Використання кодів ССК кодує 8 біт на символ зі швидкістю 11 Мбіт/с і 4 біти на символ зі швидкістю 5,5 Мбіт/с. Крім того, сама кодова послідовність складається з 8 мікросхем, і при швидкості передачі 11 Мбіт/с кодування 8 біт на символ відповідає швидкості символів 1,385 мегасимволів на секунду ($11/8 = 1,385$). Подібна швидкість передачі символів також використовується для швидкості передачі 5,5 Мбіт/с, оскільки при цій швидкості лише 4 біти кодуються в одному символі.

Особливий інтерес представляє сама послідовність ССК. Спочатку ми визначаємо, що має називатися послідовністю ССК. Для двох послідовностей ССК однакової довжини сума їхніх автокореляційних функцій для будь-якого ненульового циклічного зсуву завжди дорівнює нулю.

Рівень MAC визначає основну структуру архітектури мережі та перелік послуг, що надаються цим рівнем. Стандарт визначає два основних типи мережевої архітектури: рекламні номери та режим інфраструктури.

У спеціальному режимі, також відомому як IBSS (незалежний базовий набір послуг) або режим однорангового зв'язку (peer-to-peer), станції взаємодіють безпосередньо одна з одною. Цей режим вимагає мінімального обладнання - кожна станція повинна бути оснащена бездротовим адаптером. З цією конфігурацією мережева інфраструктура не потрібна. Основними недоліками режиму Ad Hoc є обмежений діапазон або радіус можливих мереж і можливість підключення до зовнішніх мереж, таких як Інтернет.

У режимі інфраструктури станції взаємодіють не безпосередньо одна з одною, а через точки доступу, які діють як свого роду хаби в бездротовій мережі (подібно до того, як це відбувається в традиційній дротовій мережі). Розглядаються два режими взаємодії з точкою доступу: BSS (Basic Service Set) і ESS (Extended Service Set). У режимі BSS всі станції спілкуються один з одним тільки через точку доступу, яка також може виконувати роль моста до зовнішньої мережі. У Advanced Mode - ESS існує інфраструктура з декількох мереж BSS, а самі точки доступу взаємодіють між собою, що дозволяє передавати трафік від

однієї BSS до іншої. Самі точки доступу з'єднуються між собою за допомогою дротових сегментів або радіомостів.

Для доступу до середовища передачі даних у стандартній бездротовій мережі IEEE 802.11b використовується метод множинного доступу (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance, CSMA/CA) із виявленням несучої та уникненням зіткнень. Фактично, метод, навіть за назвою, схожий на техніку множинного доступу, яка використовується в Ethernet. На практиці мережі Ethernet використовують метод множинного доступу з визначенням несучої з виявленням колізій (CSMA/CD) з ідентифікацією несучої та виявленням колізій. Єдина відмінність полягає в другій частині методу - замість виявлення зіткнень використовуються методи уникнення зіткнень.

1.4 Стандарт IEEE 802.11a

Стандарт IEEE 802.11a забезпечує швидкість передачі даних до 54 Мбіт/с. На відміну від базового стандарту, специфікація 802.11a передбачає роботу в новому діапазоні частот 5 ГГц. Вибір ортогонального частотного мультиплексування (OFDM) як методу модуляції сигналу забезпечує високу стабільність зв'язку в умовах багатопроменевого поширення сигналу.

Згідно з правилами FCC діапазон частот UNII розділений на три піддіапазони по 100 МГц, які мають різні обмеження на максимальну потужність випромінювання. Нижній діапазон (від 5,15 до 5,25 ГГц) видає всього 50 мВт, середній (від 5,25 до 5,35 ГГц) - 250 мВт, а верхній діапазон (від 5,725 до 5,825 ГГц) - 1 Вт. Використання трьох частотних піддіапазонів загальною шириною 300 МГц робить стандарт IEEE 802.11a найширшим у сімействі стандартів 802.11 і дозволяє розділити весь частотний діапазон на 12 каналів, кожен з яких має ширину 20 МГц, і де Вісім знаходяться в діапазоні 200 МГц від 5,15 до 5,35 ГГц, а інші чотири канали знаходяться в діапазоні 100 МГц від 5,725 до 5,825 ГГц

(рисунок 1.8). При цьому чотири високочастотні канали, які забезпечують найвищу потужність передачі, в основному використовуються для передачі сигналу поза приміщеннями.

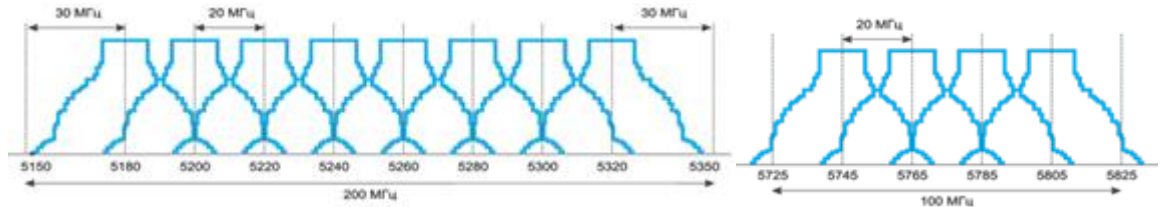


Рисунок 1.8 – Поділ діапазону UNII на 12 частотних піддіапазонів

Стандарт IEEE 802.11a базується на технології частотного ортогонального мультиплексування (OFDM). Для поділу каналів до вікна з 64 частотних підканалів застосовується зворотне перетворення Фур'є. Оскільки 12 каналів, визначених у стандарті 802.11a, мають ширину 20 МГц, кожен ортогональний частотний підканал (піднесуча) має ширину 312,5 кГц. Однак серед 64 ортогональних підканалів використовуються лише 52, 48 з яких використовуються для передачі даних (Data Tones), а решта використовуються для передачі службової інформації (Pilot Tones).

На низьких швидкостях біта BPSK і QPSK двійкова і квадратурна фазова модуляція використовуються для модуляції піднесучих. При використанні модуляції BPSK тільки один біт інформації кодується в одному символі. Таким чином, при використанні модуляції QPSK, тобто коли фаза сигналу може приймати чотири різні значення, два інформаційних біта кодуються в одному символі. Модуляція BPSK використовується для передачі даних зі швидкістю 6 Мбіт/с і 9 Мбіт/с, а модуляція QPSK — зі швидкістю 12 і 18 Мбіт/с.

Для вищих швидкостей передачі даних стандарт IEEE 802.11a використовує 16-QAM і 64-QAM квадратурну амплітудну модуляцію. У першому випадку є 16 різних станів сигналу, що дає можливість кодувати 4 біти в одному символі, у другому випадку вже є 64 можливих стани сигналу, що дає можливість кодувати в одному символі 6-значні послідовності. символи. Модуляція 16-QAM

використовується для 24 і 36 Мбіт/с, а модуляція 64-QAM використовується для 48 і 54 Мбіт/с.

Інформаційна ємність символу OFDM визначається типом модуляції та кількістю піднесучих. Оскільки для передачі даних використовується 48 піднесучих, ємність одного символу OFDM становить $48 \times N_b$, де N_b є двійковим логарифмом кількості позицій модуляції, або, простіше кажучи, кількістю бітів, закодованих у підканалі. Таким чином, символ OFDM має ємність від 48 до 288 біт.

Послідовність обробки вхідних даних (бітів) в стандарті IEEE 802.11 виглядає наступним чином. Спочатку вхідний потік даних піддається стандартній операції скремблювання. Після цього потік даних надходить на згортковий кодер. Швидкість згорткового кодування (у поєднанні з пунктурним кодуванням) може становити 1/2, 2/3 або 3/4. Оскільки швидкість згорткового кодування може бути різною, то при використанні того самого типу модуляції швидкість передачі даних виявляється різною.

Розглянемо, наприклад, модуляцію BPSK, коли він швидкість передачі становить 6 чи 9 Мбіт/с. Тривалість одного символу разом із охоронним інтервалом дорівнює 4 мкс, отже, частота проходження імпульсів становитиме 250 кГц. Враховуючи, що в кожному підканалі кодується по одному біту, а всього таких підканалів 48, отримуємо, що загальна швидкість передачі даних становитиме $250 \text{ кГц} \times 48 \text{ каналів} = 12 \text{ МГц}$. Якщо при цьому швидкість згорткового кодування дорівнює 1/2 (на кожен інформаційний біт додається один службовий), інформаційна швидкість виявиться вдвічі меншою за повну швидкість, тобто 6 Мбіт/с.

При швидкості згорткового кодування 3/4 кожні три інформаційних біта додається один службовий, у разі корисна (інформаційна) швидкість становить 3/4 від повної швидкості, тобто 9 Мбіт/с. Аналогічно кожному типу модуляції відповідають дві різні швидкості передачі (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 – Співвідношення між швидкістю передачі даних і типом модуляції в 802.11a

Швидкість передачі, Мбіт/с	Тип модуляції	Швидкість згорткового кодування	Кількість біт в одному символі в одному підканалі	Загальна кількість біт у символі	Кількість інформаційних біт у символі
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

Після згорткового кодування бітовий потік проходить операцію чергування або чергування. Його суть полягає в зміні порядку бітів у символі OFDM. Для цього вхідна послідовність бітів ділиться на блоки, довжина яких дорівнює кількості бітів у символі OFDM (NCBPS). Далі за певним алгоритмом відбувається перестановка бітів у кожному блоці в два етапи. На першому етапі біти переставляються так, що сусідні біти передаються на несуміжних піднесучих під час передачі символів OFDM.

Алгоритм заміни бітів на цьому етапі еквівалентний наступній процедурі. Спочатку блок бітів довжиною NCBPS записується рядок за рядком (рядок за рядком) в матрицю, що містить 16 рядків і NCBPS/16 рядків. Далі зчитуйте біти з цієї матриці, але по рядках (або так само, як ви пишете, але з транспонованої матриці). У результаті цієї операції спочатку сусідні біти будуть передаватися на непослідовних піднесучих.

За цим слідує другий етап заміни бітів, мета якого полягає в тому, щоб переконатися, що сусідні біти не зустрічаються одночасно в молодших бітах груп, що визначають символи модуляції в сузір'ї сигналу. Тобто після другого етапу розташування сусідні біти з'являються по черзі у старших і молодших бітах групи. Це робиться для підвищення завадостійкості переданого сигналу.

Після перемежування послідовність бітів групується відповідно до кількості позицій для вибраного типу модуляції для формування символів OFDM.

Отримані символи OFDM піддаються швидкому перетворенню Фур'є для отримання вихідних синфазних і квадратурних сигналів, які потім піддаються стандартній обробці - модуляції.

1.5 Стандарт IEEE 802.11g

Стандарт IEEE 802.11g, прийнятий у 2003 році, є логічним розвитком стандарту 802.11b, припускаючи передачу даних у тому ж частотному діапазоні, але на вищих швидкостях. Крім того, 802.11g повністю сумісний із 802.11b, що означає, що будь-який пристрій 802.11g має підтримувати пристрій 802.11b. Максимальна швидкість передачі даних у 802.11g становить 54 Мбіт/с. При розробці стандарту 802.11g були розглянуті дві конкуруючі технології: метод OFDM з ортогональним частотним поділом, запозичений зі стандарту 802.11a і запропонований для розгляду компанією Intersil, і метод двійкового блокового згорткового кодування PBCC, запропонований Texas Instruments. Тому стандарт 802.11g містить компроміс: на основі технології OFDM і ССК він може опціонально забезпечувати використання технології PBCC.

Ідея згорткового кодування (Packet Binary Convolutional Coding, PBCC) полягає в наступному. Вхідна послідовність інформаційних бітів перетворюється в згортковому кодері таким чином, що кожен вхідний біт відповідає більш ніж одному вихідному біту. Тобто згортковий кодер додає певну кількість

надлишкової інформації до вихідної послідовності. Наприклад, якщо кожен вхідний біт відповідає двом вихідним бітам, тоді можна сказати, що швидкість згорткового кодування дорівнює $1/2$. Якщо кожним двом вхідним бітам відповідають три вихідні, то швидкість згорткового кодування вже становить $2/3$.

Будь-який згортковий кодер побудований на основі кількох послідовно з'єднаних комірок пам'яті та елементів XOR. Кількість місць пам'яті визначає кількість можливих станів кодера. Наприклад, якщо згортковий кодер використовує шість комірок пам'яті, кодер зберігає інформацію про шість попередніх станів сигналу, і з урахуванням значень вхідних бітів отримуємо, що в такому кодері використовуються сім бітів вхідної послідовності цей згортковий кодер називається кодером із семи станами.

Вихідні біти, згенеровані згортковим кодером, визначаються операцією XOR між значенням вхідного біта та бітом, що зберігається в пам'яті, тобто значення кожного згенерованого вихідного біта залежить не тільки від вхідних інформаційних бітів, але також кілька попередніх бітів.

Основною перевагою згорткових кодерів є перешкодозахищеність послідовностей, які вони формують. Фактично, завдяки надлишковості кодування можна точно відновити оригінальну послідовність бітів, навіть у разі помилок прийому. Для відновлення вихідної послідовності бітів у приймачі використовується декодер Вітербі.

Цифри, згенеровані згортковим кодером, пізніше використовуються як символи передачі, але спочатку вони модулюються за фазою. Крім того, залежно від швидкості передачі можливі двійкові, квадратурні або навіть восьмибітні фазові модуляції.

На відміну від методів DSSS (коди Баркера, послідовності ССК), методи згорткового кодування не використовують методи спектрального розширення через використання шумоподібних послідовностей, але в цьому випадку також забезпечують стандартне спектральне розширення на 22 МГц. Для цього використовуються варіанти можливих сигнальних сузір'їв QPSK і BPSK.

Розглянутий метод кодування PBCC додатково використовується в протоколі 802.11b на швидкостях 5,5 і 11 Мбіт/с. Крім того, цей метод не обов'язковий для протоколу 802.11g зі швидкістю передачі 5,5 і 11 Мбіт/с. Загалом, завдяки сумісності протоколів 802.11b і 802.11g, технологія кодування та швидкість, надані протоколом 802.11b, також підтримуються в протоколі 802.11g. У цьому відношенні до 11 Мбіт/с 802.11b і 802.11g однакові, за винятком того, що 802.11g пропонує швидкість, якої немає у 802.11b.

Опціонально у протоколі 802.11g технологія PBCC може використовуватися при швидкостях передачі 22 та 33 Мбіт/с.

Для швидкості 22 Мбіт/с проти вже розглянутої нами схемою PBCC передача даних має дві особливості. Насамперед застосовується 8-позиційна фазова модуляція (8-PSK), тобто фаза сигналу може приймати вісім різних значень, що дозволяє в одному символі кодувати вже три біти. Крім того, до схеми, за винятком згорткового кодера, доданий пунктурний кодер (Puncture). Сенс такого рішення досить простий: надмірність згорткового кодера, рівна 2 (на кожен вхідний біт припадає два вихідних), досить висока і за певних умов завадової обстановки є зайвою, тому можна зменшити надмірність, щоб, наприклад, кожним двом вхідним бітам відповідали три вихідні. Для цього можна, звичайно, розробити відповідний згортковий кодер, але краще додати в схему спеціальний пунктурний кодер, який просто знищуватиме зайві біти. Допустимо, пунктурний кодер видаляє один біт з кожних чотирьох вхідних біт. Тоді кожним чотирьом вхідним бітам будуть відповідати три вихідні. Швидкість такого кодера становить $4/3$. Якщо ж такий кодер використовується в парі з згортковим кодером зі швидкістю $1/2$, то загальна швидкість кодування складе вже $2/3$, тобто кожним двом вхідним бітам будуть відповідати три вихідні.

Технологія PBCC є опціональною у стандарті IEEE 802.11g, а технологія OFDM – обов'язковою. Для того щоб зрозуміти суть технології OFDM, розглянемо детальніше багатопроменеву інтерференцію, що виникає при поширенні сигналів у відкритому середовищі.

Стандарт 802.11g використовує двійкову та квадратурну фазову модуляцію BPSK і QPSK на низьких бітових швидкостях. При використанні модуляції BPSK в символі кодується лише один інформаційний біт, тоді як при використанні модуляції QPSK кодуються два інформаційні біти. Модуляція BPSK використовується для передачі даних зі швидкістю 6 Мбіт/с і 9 Мбіт/с, а модуляція QPSK — зі швидкістю 12 і 18 Мбіт/с.

Для високошвидкісної передачі використовується квадратурна амплітудна модуляція (QAM), у якій інформація кодується шляхом зміни фази та амплітуди сигналу. Стандарт 802.11g використовує модуляцію 16-QAM і 64-QAM.

Перша модуляція використовує 16 різних станів сигналу, що дозволяє кодувати 4 біти в одному символі; друга - 64 можливих стану сигналу, що дозволяє кодувати 6-бітові послідовності в одному символі. Модуляція 16-QAM використовується для 24 і 36 Мбіт/с, а модуляція 64-QAM використовується для 48 і 54 Мбіт/с.

1.6 Стандарт IEEE 802.11n

Цей стандарт був затверджений 11 вересня 2009 року. 802.11n забезпечує швидкість порівнянну з дротовими стандартами.

Можна відзначити наступні основні переваги стандарту 802.11n:

- висока швидкість передачі даних (приблизно 300 Мбіт/с);
- рівномірне, стабільне, надійне та якісне покриття;
- сумісність з попередніми версіями стандарту Wi-Fi.

Недоліки стандарту:

- високе енергоспоживання;
- два діапазони роботи (можлива заміна обладнання);
- складне і більш велике обладнання.

Збільшення швидкості передачі в стандарті IEEE 802.11n було досягнуто, по-перше, за рахунок подвоєння ширини каналу з 20 МГц до 40 МГц, а по-друге, за рахунок впровадження технології MIMO.

Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) передбачає використання кількох передавальних і приймальних антен. За аналогією, традиційна система, тобто система з однією передавальною та однією приймальною антеною, називається SISO (Single Input Single Output). Стандарт IEEE 802.11n базується на технології OFDM-MIMO. Багато технічних деталей його реалізації запозичено зі стандарту 802.11a, однак стандарт IEEE 802.11n визначає діапазон частот для використання зі стандартом IEEE 802.11a та діапазон частот для стандарту IEEE 802.11b/g. Тобто пристрої, що підтримують стандарт IEEE 802.11n, можуть працювати як в діапазоні частот 5, так і в 2,4 ГГц.

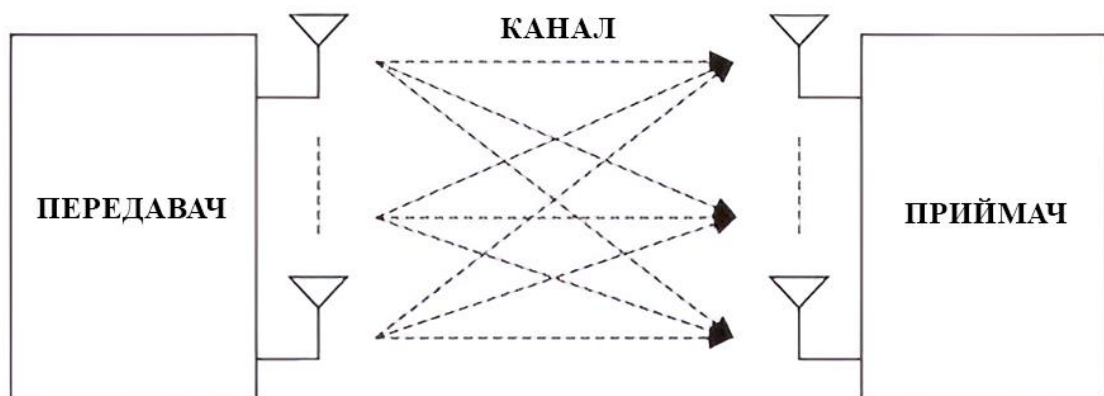


Рисунок 1.9 – принцип реалізації технології MIMO

Передавана послідовність розбивається на паралельні потоки, з яких вихідний сигнал відновлюється на приймальному кінці. Тут виникає певна складність - кожна антена приймає накладені сигнали, які повинні бути відокремлені один від одного. Для цього на приймальному кінці використовується спеціально розроблений алгоритм виявлення сигналу в просторі. Алгоритм заснований на виділенні піднесучих і тим складніше, чим більше їх кількість. Єдиним недоліком використання MIMO є складність і обсяг системи, а отже, високе енергоспоживання.

Для забезпечення сумісності між станціями MIMO та традиційними станціями існує три режими роботи:

- традиційний режим;
- змішаний режим;
- режим зеленого поля.

Кожен режим роботи має власну структуру преамбули - службове поле пакета даних, яке вказує на початок передачі і використовується для синхронізації приймача і передавача. Преамбула містить інформацію про довжину пакета та його тип, включаючи тип модуляції, обраний метод кодування та всі параметри кодування. Щоб уникнути операційних конфліктів між станціями MIMO та звичайним (використовується одна антена) обміном між станціями MIMO, до пакетів даних додаються спеціальні преамбули та заголовки. Після отримання такої інформації станції, що працюють у традиційному режимі, затримують передачу до завершення сесії між станціями MIMO. Крім того, структура преамбули визначає деякі з основних завдань приймача, такі як оцінка потужності отриманого сигналу для систем автоматичного регулювання підсилення, виявлення початку пакету, часу та частотного зсуву.

Швидкість передачі даних залежить від багатьох факторів (табл. 1.2), найважливішим з яких є пропускна здатність. Чим він ширший, тим вищий курс. Другим фактором є кількість паралельних ниток. У стандарті 802.11n максимальна кількість каналів становить 4. Тип модуляції та метод кодування також важливі.

Коди виправлення помилок, які зазвичай використовуються в мережах, включають введення певної надлишковості. Якщо захисних бітів занадто багато, швидкість передачі корисної інформації буде знижена. У стандарті 802.11n максимальна відносна швидкість кодування може досягати $5/6$, тобто кожні 5 біт даних мають 1 зайвий біт. У таблиці 1.3 перераховані швидкості передачі QAM і BPSK. Видно, що за інших рівних параметрів модуляція QAM забезпечує більшу швидкість.

Таблиця 1.3 – Швидкості передачі даних для різних типів модуляції

Модуляція	Відносна швидкість кодування	Смуга пропускання, МГц	Кількість піднесених	Число каналів	Швидкість передачі даних при CP=800нс	Швидкість передачі даних при GCP=400нс
BPSK	1/2	20	52	1	6,5	7,2
64-QAM	5/6				65	72,2
BPSK	1/2			2	13	14,4
64-QAM	5/6				130	144
BPSK	1/2			3	19,5	21,7
64-QAM	5/6				195	216,7
BPSK	1/2			4	26	28,9
64-QAM	5/6				260	288,9
BPSK	1/2	40	108	1	13,5	15
64-QAM	5/6				135	150
BPSK	1/2			2	27	30
64-QAM	5/6				270	300
BPSK	1/2			3	40,5	45
64-QAM	5/6				405	450
BPSK	1/2			4	54	60
64-QAM	5/6				540	600

Стандарт IEEE 802.11n дозволяє точкам доступу та бездротовим адаптерам використовувати до чотирьох антен. Примусовий режим означає підтримку двох антен у точці доступу, однієї антени та бездротового адаптера. Стандарт IEEE 802.11n забезпечує стандартні канали 20 МГц і канали подвійної ширини.

1.7 Стандарт IEEE 802.11ac

Наприкінці 2008 року була створена робоча група TGac, яка приступила до розробки стандарту 802.11ac. Основною метою її роботи є суттєве збільшення пропускної здатності стандарту 802.11, що дозволяє бездротовим мережам працювати зі швидкістю, порівнянною з дротовими мережами Ethernet.

Для підтримки нових програм і майбутнього тестування пристроїв TGac визначив три ключові вимоги до продуктивності та функціональності 802.11ac.

1. Продуктивність системи. Стандарт 802.11ac повинен досягати максимальної пропускної здатності принаймні 500 Мбіт/с для однієї станції (режим однієї станції) і принаймні 1 Гбіт/с для кількох станцій (режим кількох станцій).

Це швидкість рівня MAC, виміряна в точці доступу до служби (SAP) у діапазоні 5 ГГц на ширині каналу 80 МГц або менше. Оскільки це вимога для рівня MAC, а не для фізичного рівня, це означає, що проблему ефективності MAC не слід вирішувати лише збільшенням швидкості передачі даних фізичного рівня.

Це вимоги стандарту 802.11ac (тобто документа), які не стосуються окремих пристроїв. У стандарті зазначено, що пристрій може називати себе пристроєм 802.11ac, якщо він підтримує 293 Мбіт/с для одного користувача на частоті 80 МГц і взагалі не підтримує кількох користувачів.

2. Зворотна сумісність. Передбачається, що стандарт 802.11ac має зворотну сумісність і взаємодію з пристроями 802.11a/n. Для цього необхідно визначити каркасну структуру. Оскільки 802.11ac працює в діапазоні 5 ГГц, він не сумісний із пристроями 802.11b/g.

3. Співіснування. Стандарт 802.11ac повинен містити механізми для підтримки співіснування пристроїв 802.11ac із розгорнутими пристроями 802.11a/n.

Щоб забезпечити зворотну сумісність і співіснування, 802.11ac повторно використовує схеми технології 802.11n, де це можливо. Зокрема, він використовує ту саму модуляцію OFDM на фізичному рівні та підтримує ту саму архітектуру кодування та чергування, що й 802.11n. Однак для кращої продуктивності необхідні деякі зміни в старих і введення нових функцій.

Під час розробки стандарту було виявлено низку додатків, які потребують підвищеної пропускної здатності. Вони мають шість основних моделей використання:

- бездротові пристрої відображення;
- розподіл трафіку HDTV, потокове відео;
- швидке завантаження великих файлів з/на сервер;

- зворотна передача трафіку (між спільнотами, точка-точка);
- розгортання в університетах та аудиторіях;
- автоматизація виробництва підлоги.

Швидкість бездротового зв'язку є продуктом трьох компонентів: пропускної здатності каналу, щільності сузір'я та кількості просторових потоків. У цих трьох напрямках розвивається стандарт 802.11ac.

Математично РНУ - швидкості 802.11ac обчислюються відповідно до таблиці 1.4. Так, наприклад, для смуги пропускання 80 МГц, модуляції 256QAM з трьома просторовими потоками та коротким захисним інтервалом швидкість буде: $234 \times 3 \times 5/6 \times 8 \text{ біт} / 3,6 \text{ мкс} = 1300 \text{ Мбіт/с}$.

Таблиця 1.4 – Розрахунок максимально можливих значень швидкості 802.11ac на прикладі стандарту 802.11n

Фізичний рівень	Кількість інформаційних піднесучих (смуга пропускання)	Кількість просторових потоків	Біт даних на одну піднесучу	Тривалість захисного інтервалу		Швидкість даних на фізичному рівні (біт/с)
				3.6 мкс (короткий захисний інтервал)	4 мкс (довгий захисний інтервал)	
11n або 11ac	52(20 МГц)	Від 1 до 4	Максимально для 64QAM: $5/6 \times \log_2(64) = 5$			
	108 (40 МГц)					
Тільки 11ac	234 (80 МГц)	Від 5 до 8	Максимально для 256QAM: $5/6 \times \log_2(256) \approx 6.67$			
	2×234 (160 МГц)					

Ви можете безпосередньо побачити, що збільшення смуги пропускання каналу до 80 МГц збільшує швидкість у 2,16 рази, а подальше збільшення смуги пропускання до 160 МГц знову подвоює швидкість.

Перехід від модуляції 64QAM до 256QAM також допомагає збільшити швидкість ще в $8/6=1,33$ рази (рис. 1.10). Крім того, швидкість пропорційна кількості просторових потоків. У 802.11ac їх кількість збільшено до 8, що дозволяє знову подвоїти максимальну швидкість.

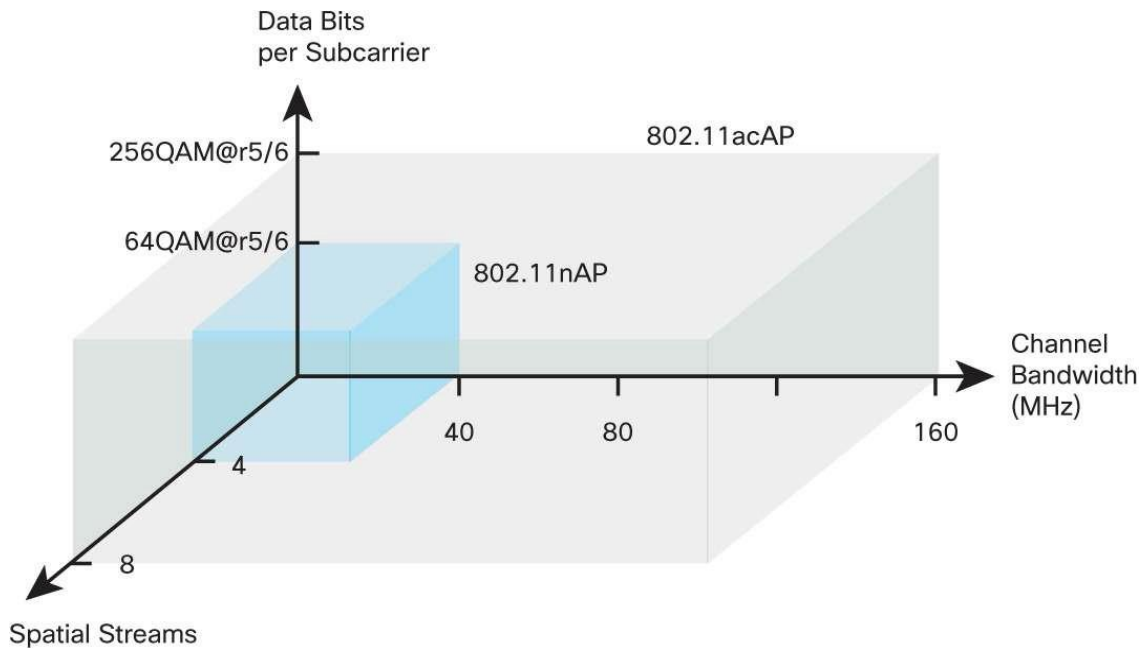


Рисунок 1.10 – Приклад того, наскільки 802.11ac перевищує стандарт 802.11n

Пристрої 802.11ac працюють лише в діапазоні 5 ГГц. Вибір обмежити використання цим діапазоном частот насамперед пов'язаний з вимогами до пропускної здатності каналу. Із значним збільшенням пропускної здатності каналу компонування каналу стає проблемою, особливо в переповненому та фрагментованому діапазоні 2,4 ГГц. Діапазон 5 ГГц дозволяє значно збільшити смугу пропускання, доступну для бездротової передачі. Він також запобігає перешкодам від пристроїв, що працюють у діапазоні 2,4 ГГц, включаючи перші пристрої 802.11b/g, пристрої Bluetooth, мікрохвильові печі тощо. Усі канали розміщені в трьох діапазонах спектру: 5,170 - 5,330 ГГц; 5,490 - 5,730 ГГц і 5,735 - 5,835 ГГц (рис. 1.11). Стандарт 802.11n вимагає, щоб пристрої підтримували канали 20 МГц, а також дозволяє використовувати додатковий канал 40 МГц шляхом поєднання двох каналів 20 МГц.

Стандарт 802.11ac використовує цей простий підхід до забезпечення пропускної здатності. Сусідні канали 20 МГц об'єднуються попарно, щоб отримати канали 40 МГц, а сусідні канали 40 МГц об'єднуються парами, щоб отримати канали 80 МГц. 802.11ac передбачає підтримку каналів 20, 40 і 80 МГц. Також дозволяється використовувати два суміжні канали 80 МГц у режимі 160

МГц або два несуміжні канали в режимі 80+80 МГц, коли це необхідно. Подвоєння смуги пропускання каналу з 40 МГц до 80 МГц є дуже економічно ефективним способом підвищення продуктивності. Всього максимально можливо до 24 каналів по 20 МГц, до 11 каналів по 40 МГц, до 5 каналів по 80 МГц і 2 канали по 160 МГц.

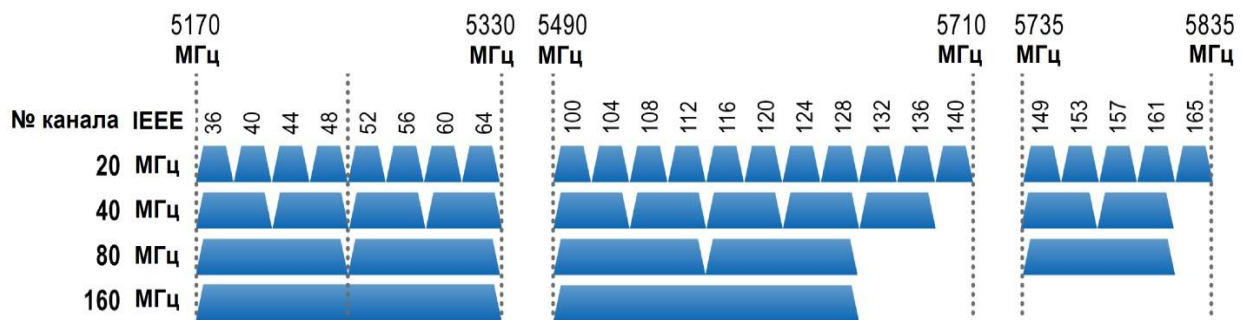


Рисунок 1.11 – Розподіл каналів у сегменті спектра

Точки доступу та їхні клієнти використовують різні частотні діапазони для різних цілей, але використання залежить насамперед від можливостей клієнтів.

Подвоюючи пропускну здатність, кожен просторовий потік може підтримувати приблизно подвоєну кількість бітів на символ. Таким чином, використання смуги пропускання 80 МГц для передачі одного потоку може забезпечити таку саму продуктивність, як використання смуги пропускання 40 МГц для передачі двох потоків. Щоб підтримувати два потоки, передавач і приймач повинні мати принаймні дві антени, і одна антена потрібна для передачі (або прийому) одного потоку. Таким чином, система 80 МГц потребує менше апаратного забезпечення для досягнення такої ж продуктивності, як система 40 МГц. Це зменшує енергоспоживання пристрою за рахунок використання меншої кількості радіочастотних компонентів. Конструкція 80 МГц буде більш вимогливою, ніж конструкція 40 МГц, але система з вищою смугою пропускання збереже перевагу в ціні.

Однак системи з однією антеною не можуть забезпечити надійність, необхідну в певних сценаріях якості обслуговування. Щоб забезпечити стабільну

передачу відео, кількість антен має бути більше кількості просторових потоків. Просторове рознесення є ключовою частиною стабільної передачі даних за допомогою QoS. Таким чином, навіть система 80 МГц повинна бути побудована з кількома антенами, якщо вона буде використовуватися в програмах, які вимагають стабільної та надійної передачі даних.

Крім того, у реальних сценаріях продуктивність залежить не лише від швидкості фізичного рівня, а й від перешкод з боку інших найближчих мереж.

Оскільки канали в 802.11ac ширші, ситуації збігу стають більш імовірними, і для однієї точки доступу 80 МГц, яка з'єднує всіх клієнтів, стає важче уникнути перешкод від суміжних мереж (це може бути мережа 802.11n 20/40 МГц). Це означає, що точка доступу 802.11ac повинна спільно використовувати той самий канал із кожною сусідньою точкою доступу, звертаючись до неї лише частину часу. Крім того, недоліком системи 80 МГц є те, що всі чотири канали 20 МГц (або два канали 40 МГц) повинні бути вільними для початку повної передачі 80 МГц. Передача 20/40 МГц на будь-якій частині каналу 80 МГц створить перешкоди для передачі всього діапазону. Це зменшує ймовірність доступу до повного каналу системи 802.11ac у щільному середовищі. Зауважте, що 802.11ac забезпечує механізм для систем із частотою 80 МГц для повернення до режиму обмеженої пропускної здатності, який називається «Режим динамічної пропускної здатності». Цей механізм необов'язковий.

1.8 Стандарт IEEE 802.11ax

Стандарт IEEE 802.11ax, який отримав назву Wi-Fi 6 відповідно до нової угоди про найменування.

Перша відмінна риса це висока щільність мереж Wi-Fi. Така ситуація характерна для стадіонів, аеропортів, вокзалів, виставкових залів, торгових центрів, коли в одній зоні простору працюють сотні точок доступу Wi-Fi. Подібні

щільні розташування бездротових мереж часто зустрічаються в житлових або офісних будівлях: сьогодні кожна квартира або офіс зазвичай має одну або навіть кілька точок доступу Wi-Fi.

Друга характеристика пов'язана з типом руху. Сценарії використання мережі 802.11ax передбачають дуже неоднорідний трафік, тоді як у попередніх доповненнях до Wi-Fi кожен сценарій використання зазвичай розглядав лише один тип трафіку (наприклад, потокове відео в реальному часі, завантаження файлів або перегляд веб-сторінок). У сценарії 802.11ax клієнти одночасно використовують різні програми з різними типами трафіку.

Третьою характеристикою є інтенсивне використання апліквів у сучасних бездротових мережах, що можна пояснити масовим завантаженням фотографій, відео та документів у соціальні мережі та хмарні сервіси.

Фізичний рівень, який використовується в розширеннях 802.11ax, зазвичай успадковується від розширень 802.11n і 802.11ac. Мережі 802.11ax також використовують мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM) і підтримують канали 20, 40, 80, 80+80 і 160 МГц. Як згадувалося вище, додана функція використовуватиме множинний доступ з ортогональним частотним поділом (OFDMA). Щоб збільшити кількість піднесучих і забезпечити кращу вибірковість при використанні методів OFDMA, розмір символу OFDM, який використовується для передачі блоків даних користувача, було збільшено в 4 рази, тобто 12,8 мкс замість 3,2 мкс. Символи OFDM більшої тривалості також підвищують надійність багатокористувацьких передач у висхідній лінії зв'язку, де може виникнути велике тремтіння через неточну синхронізацію часу між користувачами, що передають. Додаток 802.11ax також збільшує захисний інтервал (GI) між символами OFDM, щоб зменшити міжсимвольні перешкоди. Через збільшення накладних витрат у разі використання довшого захисного інтервалу додана довжина захисного інтервалу пропонує три варіанти: стандартні 0,8 мкс і додаткові 1,6 мкс і 3,2 мкс.

Доповнення також змінює формат кадру. Кожен кадр починається з преамбули, яка повторюється в кожному підканалі 20 МГц, якщо ширина каналу

перевищує 20 МГц (рис. 1.12). Преамбула складається з двох частин: стандартної частини та преамбули 802.11ах. Стандартна частина преамбули може бути декодована будь-якою станцією Wi-Fi і використовується для зворотної сумісності з нею. Крім того, він містить спеціальні навчальні послідовності (LSTF і LLTF), які необхідні приймачу для синхронізації та налаштування прийнятого сигналу, і поле LSIG, яке містить інформацію, необхідну для розрахунку тривалості кадру (рис. 1.13). Преамбула 802.11ах може бути декодована лише станціями 802.11ах. Важливо мати можливість швидко та з невеликою похибкою відрізнити кадр 802.11ах від раніше доданого кадру. Для цього було вирішено продублювати поле LSIG стандартної частини преамбули. Станція 802.11ах виявляє кадр 802.11ах, коли виявляє дублювання поля LSIG. Нова преамбула містить обов'язкове поле HE-SIG-A, необов'язкове поле HE-SIG-B і спеціальну навчальну послідовність, необхідну для налаштування MIMO.

Тривалість поля HE-SIG-A становить два символи OFDM, у разі використання каналу шириною понад 20 МГц, дубльовані в кожному підканалі шириною 20 МГц, що містить пакети обробки інформації, необхідні для прийому: використаний сигнал структура кодування (SCS), ширина каналу, кількість просторових потоків (Number of Spatial Streams). В останніх доповненнях до стандарту Wi-Fi деяку інформацію про протокол каналу передачі даних (MAC) було перенесено до преамбули пакета. У групі TGах цей підхід отримав подальший розвиток. Наприклад, поле HESIG-A містить таку інформацію, як неунікальний ідентифікатор мережі, тривалість запланованої передачі (можливість передачі, TXOP), прапор, який вказує, чи передається висхідна або низхідна лінія тощо. Включення цієї інформації в преамбулу дозволяє отримати важливу інформацію без декодування всього пакета. Оскільки службова інформація, що міститься в полі HE-SIG-A, може бути корисною не тільки для передбачуваного одержувача, але й для інших станцій мережі, необхідно забезпечити надійну передачу цього поля.

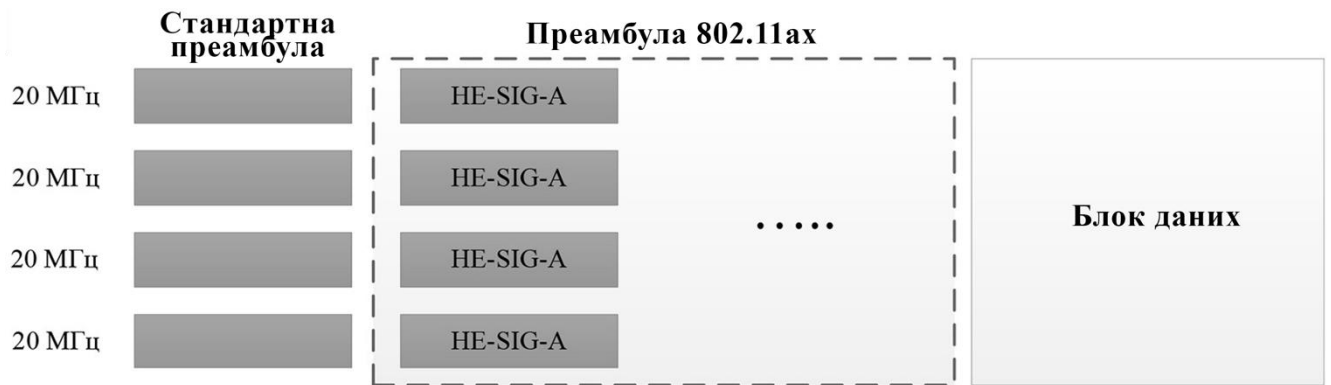


Рисунок 1.12 – Стандартна преамбула та поля HE-SIG-A у преамбулі 802.11ax повторюються в кожному підканалі 20 МГц

Розмір поля HE-SIG-A для двох символів OFDM достатньо великий, щоб покрити всі накладні витрати, необхідні для передачі на один приймач. У разі багатокористувацької передачі до кількох приймачів неможливо помістити всю службову інформацію в поле HE-SIG-A, тому в преамбулі з'являється додаткове поле HE-SIG-B, яке може бути представлене як Змінна кількість символів OFDM. Поле HE-SIG-B містить службову інформацію, спільну для всіх приймальних станцій, і індивідуальну службову інформацію для кожної станції.



Рисунок 1.13 – Структура кадру 802.11ax

У разі передачі по каналу, ширина якого перевищує 20 МГц, поле HE-SIG-B, як і поле HE-SIG-A, дублюється в кожному підканалі 20 МГц. Однак, щоб підвищити ефективність використання ресурсів каналу, було вирішено прийняти наступний метод: коли використовується для передачі каналу з шириною ≥ 40 МГц, два суміжні підканали 20 МГц містять різні частини HE-SIG-B поле, а решта підканалів повторюють інформацію (рис. 1.14).



Рисунок 1.14 – Вміст підканалів 20 МГц при передачі полів HE-SIG-B у каналах шириною ≥ 40 МГц

Нарешті, давайте розглянемо нову схему модуляції, запропоновану робочою групою TGax. Додана функціональність дозволяє вперше використовувати квадратурну модуляцію 1024-QAM у мережах Wi-Fi. Звичайно, використання такої модуляції високого порядку вимагає значного відношення сигнал/перешкода/шум (SINR), що спричиняє часті помилки декодування, і в основному підходить для використання в приміщенні, де відстань між передавачем і приймачем відносно закрити. Крім того, додавання 802.11ax дозволяє використовувати так звану модуляцію подвійної піднесучої (DCM). DCM включає в себе передачу тієї самої інформації на парі піднесучих, які досить далеко одна від одної в частотній області, щоб забезпечити низькі взаємні перешкоди.

Передача службових кадрів споживає досить багато ресурсів каналу. Щоб якось зменшити накладні витрати через наявність службового трафіку, 802.11ax додав заборону на передачу маячків і багатьох інших службових кадрів на швидкості нижче 5,5 Мбіт/с у діапазоні 2,4 ГГц.

2 АНАЛІЗ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ

Джузеппе Біанакі запропонував просту, але досить точну аналітичну модель для розрахунку пропускної здатності на основі кількості підключених пристроїв. Передбачається, що передача відбувається в ідеальному каналі без прихованих вузлів. В аналізі використовувався умова насичення мережі. Одиницею масштабу

параметри. Крім того, ми припускаємо ідеальні умови каналу передачі на фізичному рівні, головним чином зосереджені на рівні MAC.

Мінімальний розмір блоку ресурсу RU встановлено на 242 піднесучі, що відповідає каналу 20 МГц. Потоки MU-MIMO (багатокористувацький MIMO) можуть бути виділені в кожному блоці ресурсів RU. Таким чином, використовуючи канал 160 МГц і 8 антен, можна мультиплексувати до 64 окремих станцій, забезпечуючи кожній станції один просторовий потік. Передбачається, що точки доступу та станції мають модель повного буферного трафіку, тобто вони завжди мають готовий для передачі кадр. Кожного разу, коли передається агрегований елемент даних протоколу MAC (A-MPDU), кадр MAC довжиною біта LD агрегується та надсилається відповідно до схеми агрегування пакетів A-MPDU.

Розрахунок пропускної здатності мережі вимагає врахування ймовірності колізій, тривалості цих колізій і успіху або невдачі передачі кадру. З огляду на наведені вище умови, згідно з методом розрахунку Фредеріко Б'янакі, формула для розрахунку пропускної здатності низхідного каналу має вигляд:

$$S_d = \frac{T_{data}}{T_{csi} + T_{data}} * \left(\frac{a_1 * N_a * L_D + a_3 * V_u * N_a * L_D}{b_1 * T_e + \sum_{i=1}^4 a_i * (T_{ai} + T_e) + \sum_{i=1}^4 c_1 * (T_{ci} + T_e)} \right), \quad (2.1)$$

для верхнього каналу:

$$S_u = \frac{T_{data}}{T_{csi} + T_{data}} * \left(\frac{a_2 * N_a * L_D + a_4 * V_u * N_a * L_D}{b_1 * T_e + \sum_{i=1}^4 a_i * (T_{ai} + T_e) + \sum_{i=1}^4 c_1 * (T_{ci} + T_e)} \right), \quad (2.2)$$

де $T_{a1} = T_{su}(V_s, B)$ - тривалість однокористувацької передачі вниз;

$T_{a2} = T_{su}(V_s, B)$ - тривалість однокористувацької передачі вгору;

$T_{a3} = T_{mu,d}(V_s, B)$ - тривалість багатокористувацької передачі вниз;

$T_{a4} = T_{mu,u}(V_s, V_u, B_{ru})$ - тривалість багатокористувацької передачі вгору;

$T_{c1} = T_{c4} = T_{c,su}$ - тривалість колізії для однокористувацьких передач;

$T_{c2} = T_{c3} = T_{c,mu}$ - тривалість колізії для багатокористувацьких передач.

Інтервали успішної передачі та зіткнення також включають інтервали простору, інакше вузли не зможуть зменшити свої лічильники відкату. T_{data} враховує частину часу, використану для озвучування каналу.

Наступним етапом дослідження є практична перевірка методу шляхом математичного моделювання в середовищі Matlab.

В результаті проведених розрахунків нижче виходить велика кількість діаграм, проте виділимо основні для опису властивостей ємності. Давайте висвітлимо графік пропускної здатності для кількості користувачів, показаний на рисунку 2.2.

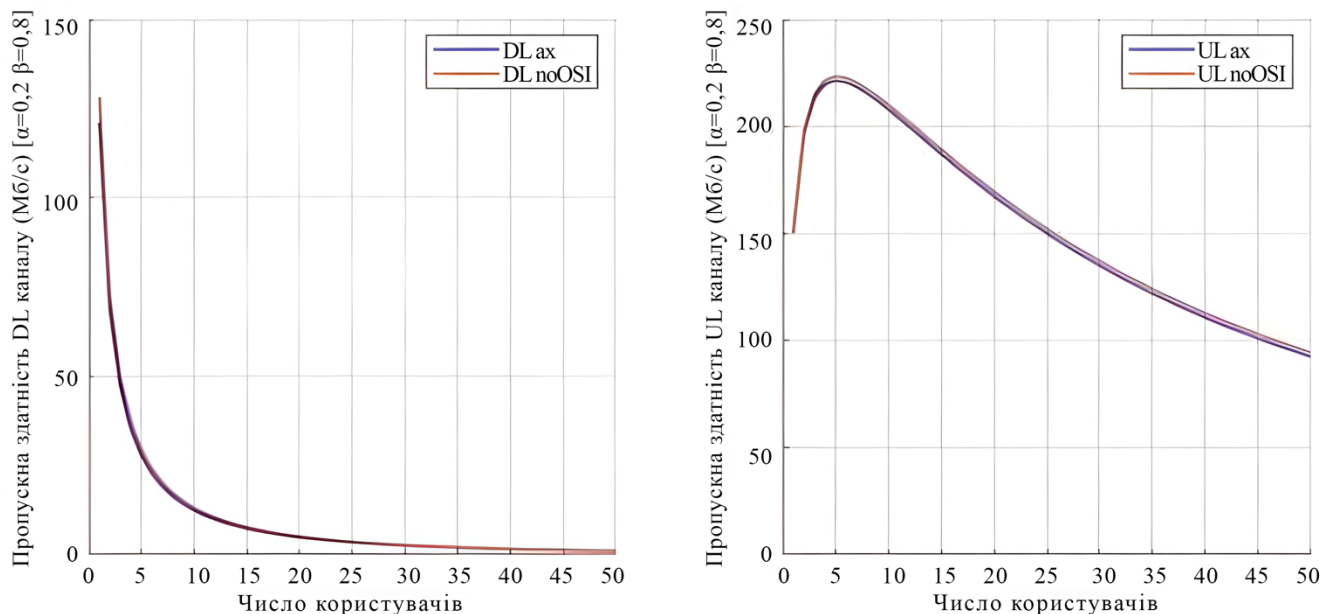


Рисунок 2.2 – Графік пропускної здатності для кількості користувачів

На цих графіках показано пропускну здатність DL і UL, досягнуту мережами IEEE 802.11ax ($\alpha = 0,2$ і $\beta = 0,8$). Забезпечує вищу пропускну здатність як для висхідної, так і для низхідної лінії зв'язку за рахунок збільшення кількості кадрів, об'єднаних в одному A-MPDU (з 64 до 256 кадрів), і підтримки багатокористувацьких передач із залученням великої кількості сайтів порівняно з попередніми поколіннями.

Ці графіки також показують, що загальна продуктивність системи не залежить від механізму перехоплення каналів у 802.11ax. Це пов'язано з тим, що

абонентські станції надсилають інформацію про стан зв'язку CSI до точки доступу паралельно, а не послідовно, як це робиться в IEEE 802.11ac, що призводить до значного скорочення витрат часу для великої кількості абонентських станцій. Ширина каналу показана на рисунку 2.3.

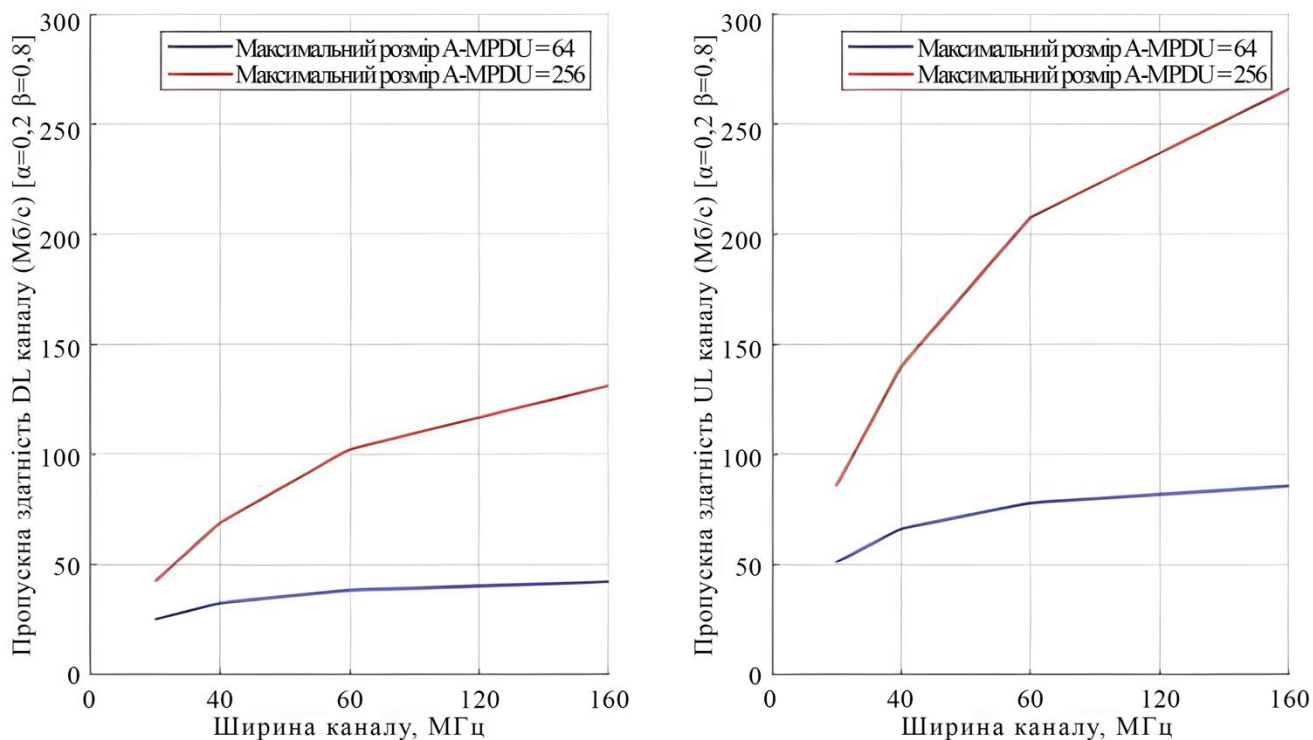


Рисунок 2.3 – Ширина каналу

На графіку показано залежність пропускної здатності від ширини каналу для DL і UL. Як і очікувалося, пропускна здатність A-MPDU максимального розміру. Цей результат можна пояснити роботою EDCA, яка забезпечує однакову пропускну здатність (у довгостроковій перспективі) висхідної лінії зв'язку, а пропускна здатність низхідної лінії зв'язку збільшується з шириною каналу. Ми можемо помітити, що якщо всі заявники використовують однакові параметри CW_{min} і CW_{max} , пропускна здатність нижче для вищих заявників.

Період часу, протягом якого абонентська станція передає, пропорційний максимальному розміру A-MPDU, збільшення цього значення зменшує ефективний час розмови, виділений AT.

Таким чином, використання великих кадрів A-MPDU може негативно вплинути на продуктивність DL, тому потрібно бути обережним під час налаштування цього параметра. Кількість антен MIMO показано на рисунку 2.4.

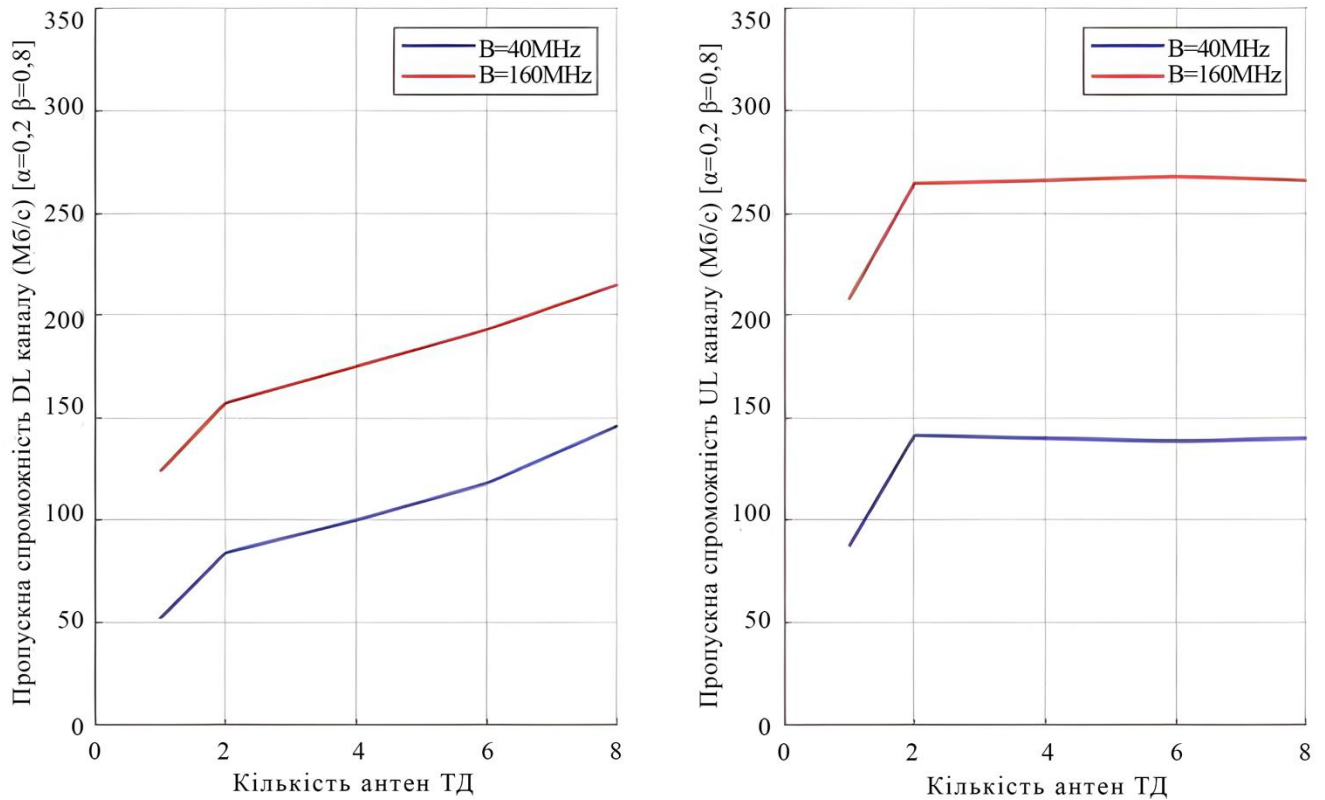


Рисунок 2.4 – Кількість антен

Збільшення кількості антен на точці доступу може збільшити кількість просторових потоків, які використовуються в однокористувацьких і багатокористувацьких передачах. На рис. На рисунку 2.4 показано, що пропускна здатність низхідної лінії зв'язку зростає зі збільшенням кількості антен у АТ, оскільки кількість абонентських станцій, мультиплексованих у кожному RU, збільшується пропорційно кількості просторових потоків, виділених кожному користувачеві в однокористувацькій передачі. Дійсно, на абонентській станції встановлено обмежену кількість антен, лише дві. Крім того, також можна помітити, що посилення, отримане від додавання додаткових антен, пропорційне ширині каналу.

Результати дають зрозуміти, як працюють мережі IEEE 802.11ax для різних конфігурацій, включаючи такі аспекти, як вплив коефіцієнта сприйняття каналу на пропускну здатність мережі, максимальний розмір A-MPDU, ширину каналу та кількість антен на точку доступу. Показує необхідність надання точних пріоритетів у плануванні AT багатокористувацьких передач у DL та UL, щоб уникнути конфліктів з абонентськими станціями та оптимізувати пропускну здатність WLAN.

У рамках дослідження запропоновано модель сегмента мережі для стандарту IEEE 802.11ax, яка враховує витрати часу на доступ до фізичного рівня та рівня каналу передачі даних.

Модель також враховує сценарії передачі як для одного, так і для кількох користувачів як низхідної, так і висхідної лінії зв'язку під час розрахунку пропускну здатності каналу в мережах IEEE 802.11ax. Недоліком цієї моделі є те, що вона не враховує втрати фізичного рівня та вплив різнорідного трафіку. Крім того, багато припущень, таких як однакова відстань усіх станцій, відсутність прихованих вузлів і умови насичення мережі, також можуть змінити загальну пропускну здатність мережі.

З моделювання в середовищі MATLAB були отримані значення пропускну здатності, які виявилися невеликими через розгляд вартості фізичного рівня та рівня каналу передачі даних.

Процедура прослуховування і зміна швидкості запитів CSI мало впливають на загальну продуктивність системи (відхилення значень пропускну здатності каналу для DL = 5,83-5,88%, UL = 0,79-1,27%), тому що абонентські станції посиляють CSI інформацію до точки доступу паралельно.

Замість того, щоб надсилати їх послідовно, це робиться в IEEE 802.11ac. Значення A-MPDU потрібно налаштовувати ретельно, оскільки його збільшення зменшує ефективний ефірний час, виділений точці доступу, і пропускну здатність мережі в низхідному напрямку на 60%.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА НАЛАШТУВАННЯ МЕРЕЖІ

3.1 Коефіцієнт ослаблення сигналу Wi-Fi

Для бездротового підключення Wi-Fi важливо, які перешкоди є на шляху поширення сигналу. Розглянуто основні типи згасання, що виникають під час поширення WiFi сигналу.

Проблема поширення радіохвиль всередині будівель і будинків приділяє значну увагу. В основному це пов'язано з модернізацією локальних інформаційних мереж за технологією Wi-Fi. Наявність стін, перегородок, меблів, електронного обладнання та інших об'єктів у будівлях створює складне середовище для поширення радіохвиль, яке дуже відрізняється від вільного простору (рис. 3.1).

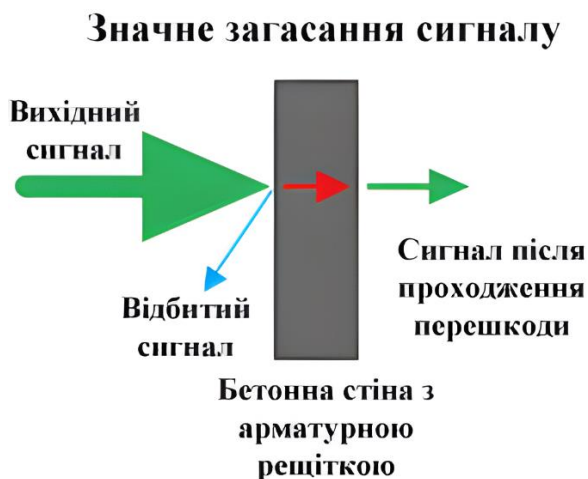
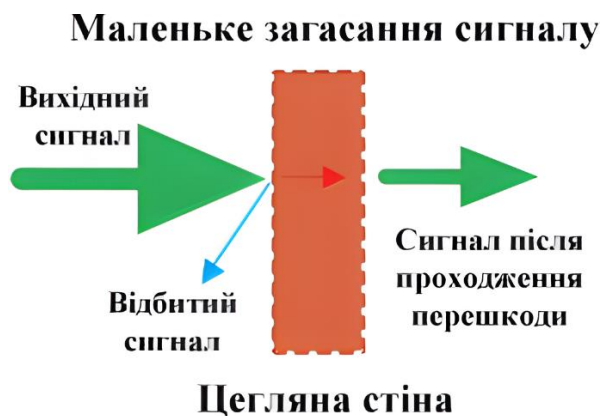


Рисунок 3.1 – Згасання сигналу після проходження крізь стіни

Основні ефекти, які спостерігаються під час поширення радіохвиль у приміщенні, викликані багаторазовим відбиттям радіохвиль від стін та інших об'єктів, дифракцією на багатьох гострих краях об'єктів і ослабленням радіохвиль, коли вони долають певну відстань крізь перешкоди.

У бездротових каналах зв'язку спостерігається два типи загасання сигналу - крупнозернисте і дрібнозернисте. Крупнозернисте загасання відображає середнє загасання потужності сигналу внаслідок поширення на відстань. Крупнозернисте загасання визначається наявністю таких об'єктів, як стіни, двері, підлога будівель тощо на шляху розповсюдження.

Дрібнозернисте загасання спричинене змінами амплітуди та фази сигналу на рівні довжини хвилі та проявляється у вигляді розтікання сигналу в часі (розсіювання у часі) та нестаціонарної поведінки частотного каналу зв'язку. У системах бездротового зв'язку параметри каналу змінюються з часом через переміщення передавача або приймача.

Якщо між передавачем і приймачем немає прямої видимості, і сигнал досягає точки прийому завдяки багаторазовим відбиттям від різних об'єктів, дрібне загасання називається Релеєм. Якщо домінує прямий сигнал (існує зона прямої видимості між передавачем і приймачем), дрібнозерниста огинаюча ослаблення описується функцією щільності ймовірності Райса. Цей тип загасання має великий вплив на загасання в каналах мобільного зв'язку через великі відстані, на які поширюється сигнал. Цей тип ослаблення є незначним у випадку сигналів Wi-Fi, що поширюються всередині будівель.

Інженери мережі з Університету Південної Каліфорнії провели дуже цікаве дослідження передачі високочастотних сигналів у діапазонах 2,4 ГГц і 5 ГГц через багато різних матеріалів.

Найбільший інтерес представляє таблиця 3.1 зі значеннями загасання при проходженні сигналу через зазначений матеріал.

Таблиця 3.1 – Рівень згасання сигналу при проходженні через зазначений матеріал

Матеріал	Зміна рівня сигналу R_{wlan} , дБ	
	2,4 ГГц	5 ГГц
Оргскло 7,1 мм	-0,36	-0,93
Оргскло 2,5 мм	-0,01	-0,2
Жалюзі закриті	-0,002	0,002
Жалюзі відкриті	0,01	0,03
Червона цегла суха	-4,44	-14,62
Червона цегла мокра	-4,51	-14,6
Килим	-0,03	-0,01
Килим з вивороту	-0,04	-0,03
Стельова плитка	-0,09	-0,18
Тканина	0,02	0,01
Склопластик	-0,02	-0,03
Скло	-0,5	-1,69
Гіпсокартон 12,8 мм	-0,49	-0,52
Гіпсокартон 9 мм	-0,51	-0,85
Лінолеум	-0,02	-0,13
Лінолеум з вивороту	-0,02	-0,12
Ялинові дошки	-2,79	-6,13
ДСП	-1,65	-1,95
Фанера	-1,91	-1,83
Штукатурка	-14,86	-13,24
Штукатурка зі зворотного боку	-14,58	-13,91
Плитка	-2,22	-1,42
Руберойд	-0,1	-0,13
Шлакоблок сухий	-6,71	-10,33
Шлакоблок мокрий	-7,35	-12,38
Металева решітка	-20,99	-13,17
Дротова сітка	-1,21	-0,34

Варто зазначити, що за винятком цегляних і шлакоблокових стін, скла, дерев'яних панелей, штукатурки та металевих решіток, більшість матеріалів мають різницю в ослабленні радіочастотного сигналу менше 1 дБ у діапазоні частот від 2,4 до 5 ГГц. І, несподівано, сигнал у діапазоні 5 ГГц був ослаблений із меншим коефіцієнтом, ніж сигнал у діапазоні 2,4 ГГц, металевою решіткою та дротяною сіткою.

Крім того, сигнал послаблюється армуванням штукатуркою (відповідно через будь-який залізобетон) і металевими решітками, що цілком очікувано. Але в той же час він не так сильно затухає при проходженні через дротяну сітку. Але крім цього, він досить помітно руйнується, коли проходить через цеглу та шлакоблоки.

3.2 План мережі

Відповідно до мети роботи мережа повинна бути розгорнута в навчальному закладі що має два поверхи. На рисунках 3.2 та 3.3 показано плани поверхів школи з характерними кімнатами. В даний час комп'ютерні мережі базуються на дротовому з'єднанні, тому постає проблема розвитку бездротового сегмента, який дозволить будь-якому користувачеві підключатися до різноманітних ресурсів мережі за допомогою різних мобільних пристроїв (наприклад, планшетів, смартфонів тощо).

Навчання – важливий етап у нашому житті, тому йому слід віддавати належну повагу. Процес навчання необхідно постійно розвивати та вдосконалювати.

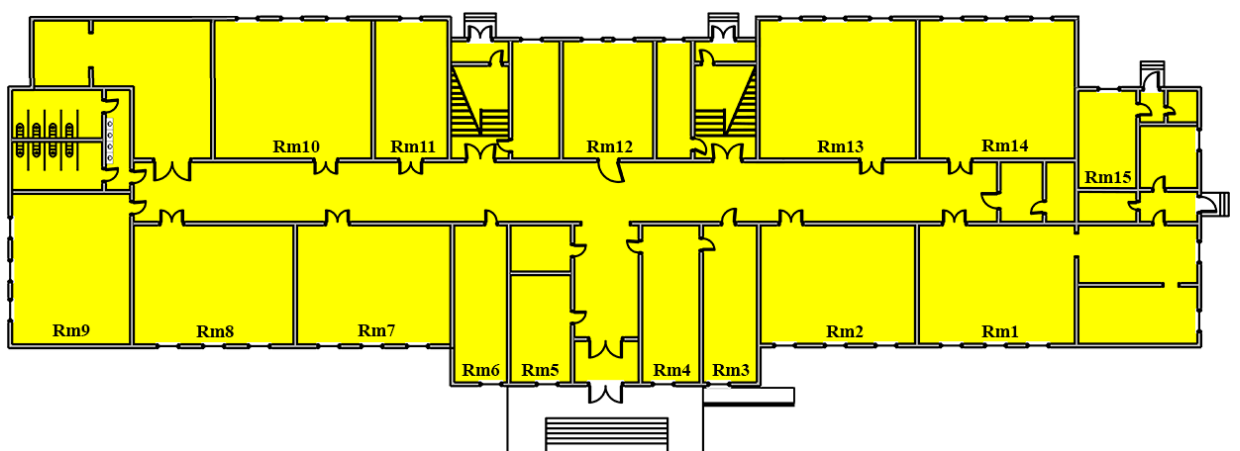


Рисунок 3.2 – План будівлі першого поверху

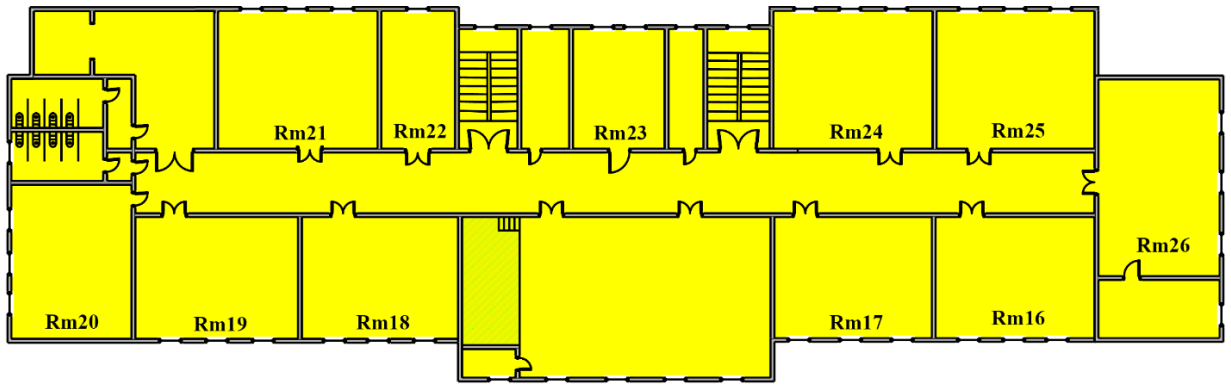


Рисунок 3.3 – План будівлі другого поверху

Висота кожного поверху будівлі між перекриттями становить 3 метри, а загальна товщина перекриттів будівлі становить 30 см, що складається з залізобетонних перекриттів. Товщина зовнішніх стін становить приблизно 45 см, а товщина внутрішніх - 9 см.

На бездротові мережі можуть негативно впливати пристрої Wi-Fi (маршрутизатори, точки доступу) що розташовані у сусідніх будинках. Це може спричинити падіння рівня мережі, а в деяких випадках і повне згасання сигналу Wi-Fi, але в нашому випадку частота була вільна від зовнішніх радіоперешкод, бо будівля навчального закладу розташована на околиці міста. Мінімальна відстань від житлової забудови – близько 100 метрів.

Переходимо до вибору обладнання для побудови бездротової мережі. Цей момент дуже важливий. Через нові вимоги та нові можливості майбутніх пристроїв неможливо замінити всі пристрої з одного на інший без великих втрат, однак вибирати пристрій потрібно дуже ретельно.

Через відсутність потенційних радіоперешкод для роботи бездротових пристроїв у радіусі де розміщений навчальний заклад ми вибрали для нашого дослідження частотні пристрої, які працюють у діапазоні частот 2,4 ГГц і 5 ГГц та підтримують стандарт IEEE 802.11ax. Пристрій має бути універсальним, щоб працювати із застарілим обладнанням, і він має мати місце для майбутнього.

Ми вибрали пристрій від виробника Mikrotik, який знаходиться в середньому сегменті та підходить під наші конкретні задачі.

MikroTik є латвійським виробником мережевого обладнання, що розробляє дротове та бездротове мережеве обладнання, особливо маршрутизатори, мережеві комутатори, точки доступу та програмне забезпечення - операційні системи та допоміжне програмне забезпечення. Продукція MikroTik відрізняється надійністю та великими можливостями для бізнесу за доступною ціною.

Одним із продуктів MikroTik є RouterOS, мережева операційна система на базі Linux. RouterOS призначена для встановлення на роутери MikroTik RouterBoard. Крім того, систему можна встановити на ПК, щоб перетворити її на маршрутизатор із такими функціями, як брандмауер, сервер/клієнт VPN, QoS, точка доступу тощо.

RouterOS надає системним адміністраторам графічний інтерфейс (WinBox) для інтуїтивно зрозумілого та швидкого налаштування брандмауера, маршрутизації та керування QoS. Зокрема, в інтерфейсі WinBox практично повністю реалізовані функції Linux-утиліт iptables, iproute2, управління потоком і QoS на основі алгоритму HTB.

RouterBOARD - це апаратна платформа MikroTik, яка являє собою серію маршрутизаторів під управлінням операційної системи RouterOS. Різноманітні опції RouterBOARD дозволяють вирішувати на їх основі різноманітні мережеві завдання: від простих бездротових точок доступу та керованих комутаторів до потужних маршрутизаторів з брандмауером і QoS.

Практично всі моделі пристроїв RouterBOARD можуть працювати по PoE та мають роз'єм для підключення зовнішнього джерела живлення.

Mikrotik hAP AX3 - найпотужніший пристрій AX із найкращим покриттям бездротової мережі (зображення пристрою на рисунку 3.4). Він має сучасний чотирьохядерний процесор ARM, що працює на частоті 1,8 ГГц, і достатньо пам'яті (1 ГБ ОЗУ + 128 МБ NAND), щоб виконувати більшість завдань. Складні правила брандмауера, апаратне шифрування IPsec, Wireguard, BGP, розширена маршрутизація та підтримка VPN-тунелів для віддаленої роботи. Бездротові можливості представлені у таблиці 3.2.



Рисунок 3.4 – Mikrotik hAP AX3

Таблиця 3.2 – Бездротові можливості hAP AX3

2,4 ГГц Макс. швидкість передачі даних	574 Мбіт/с
2,4 ГГц кількість ланцюгів	2
Стандарти 2,4 ГГц	802.11b/g/n/ax
Коефіцієнт посилення антени дБі для 2,4 ГГц	3,3
Модель чіпа 2,4 ГГц	QCN-5022
Генерація 2,4 ГГц	Wi-Fi 6
5 ГГц Макс. швидкість передачі даних	1200 Мбіт/с
5 ГГц кількість ланцюгів	2
Стандарти 5 ГГц	802.11a/n/ac/ax
Посилення антени дБі для 5 ГГц	5,5
Модель чіпа 5 ГГц	QCN-5052
Генерація 5 ГГц	Wi-Fi 6
Швидкість WiFi	AX1800

3.3 Підготовка до налаштування

Наявне обладнання, яке можна використовувати, було проаналізовано та розміщено наступним чином (будівля, перший поверх, рис. 3.5).

Роутер, розташований в кабінеті «Room15», є резервним пристроєм на випадок виходу з ладу будь-якого пристрою та вчасно замінюється.

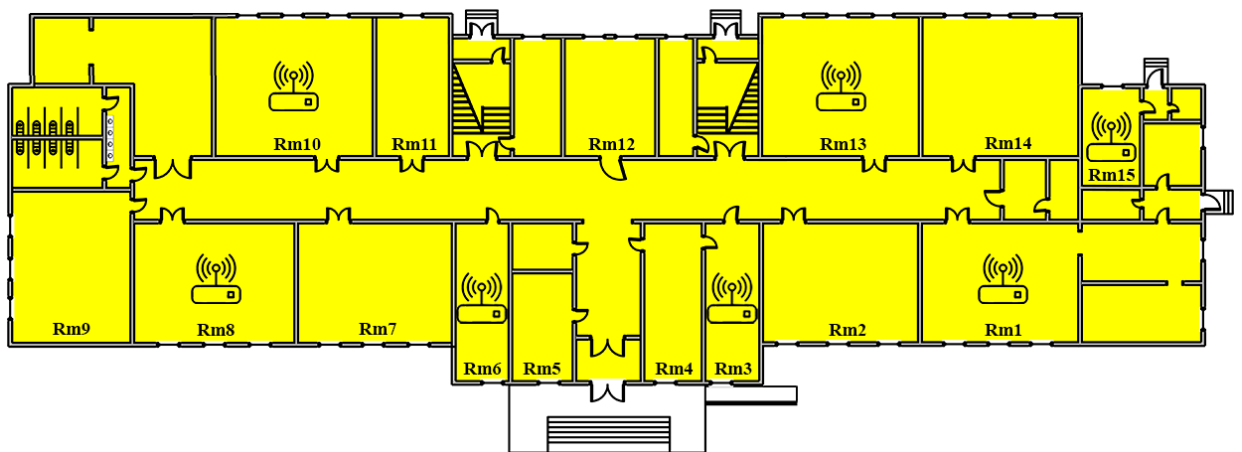


Рисунок 3.5 – Розміщення мережевого обладнання на першому поверсі

Обладнання основного вузла мережі знаходиться в кімнаті «Room17» на другому поверсі, куди також входять кабелі Інтернет-провайдера (другий поверх, рисунок 3.6)

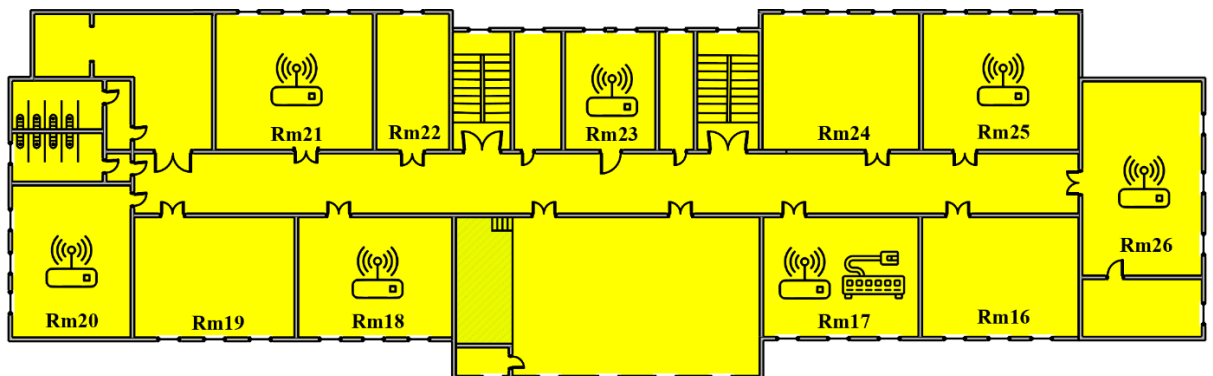


Рисунок 3.6 – Розміщення мережевого обладнання на другому поверсі

Підключення пристроїв відбувалося за схемою на рисунку 3.7.

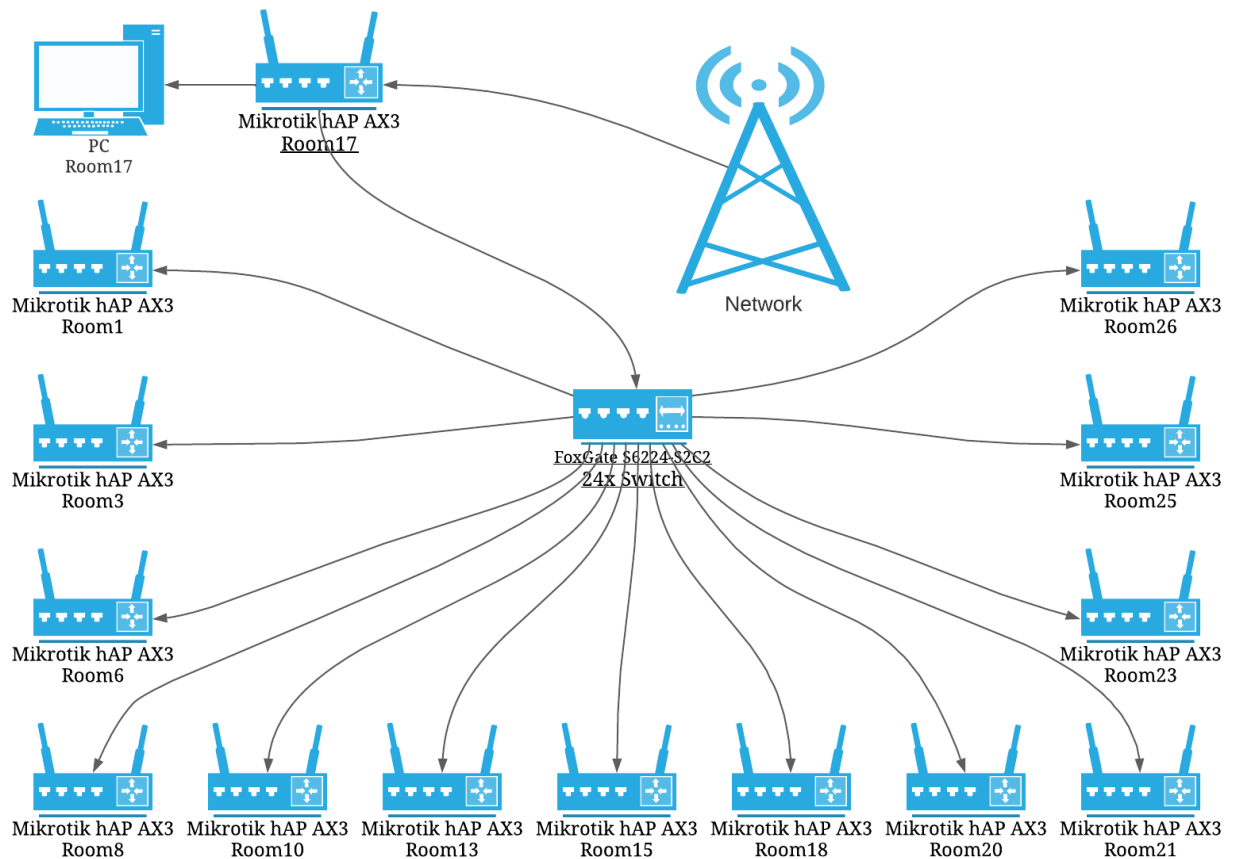


Рисунок 3.7 – Схема підключення мережевого обладнання

3.4 Підключення та налаштування

Підключимо основний кабель з інтернетом від провайдера до WAN-порту роутера Mikrotik та під'єднаємо комп'ютер для налаштування, який знаходиться в кабінеті «Room17», до будь-якого вільного LAN-порту на роутері (в нашому випадку це п'ятий порт).

Ми можемо налаштувати роутер MikroTik різними способами:

- WinBox - це програма керування Mikrotik RouterOS, яка використовує легкий та досить простий у використанні системний інтерфейс Windows;
- Webfig - настройка за допомогою веб-інтерфейсу в браузері;
- Telnet - налаштування по мережевому протоколу TELNET.

Також доступ до пристроїв під керуванням RouterOS також можна отримати через FTP (протокол передачі файлів) та протокол SSH (протокол безпечної оболонки). Також існує API (Application Programming Interface), який дозволяє створювати спеціалізовані програми для управління та моніторингу.

Ми використовуємо програму WinBox для налаштування роутерів Mikrotik, скористаємось пошуковою системою, щоб знайти WinBox у вікні браузера, завантажити програму з офіційної сторінки mikrotik та запустити її.

Ми використовуємо мережеву утиліту WinBox для підключення до пристрою, як показано на рисунку 3.8.

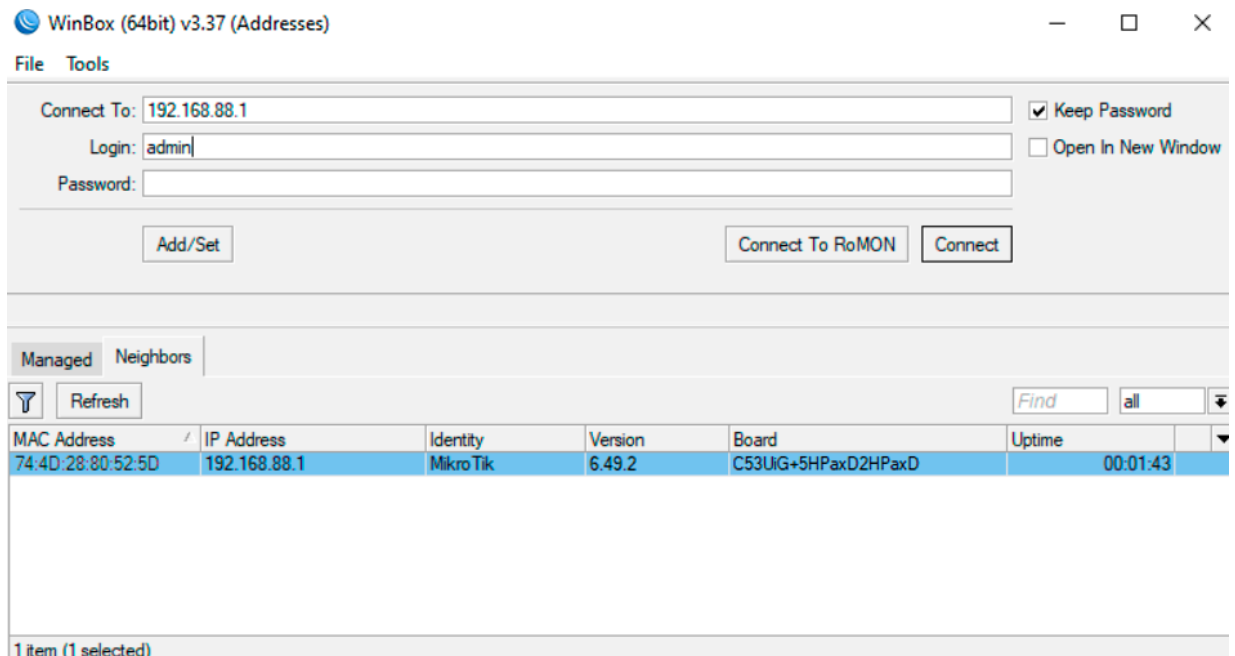


Рисунок 3.8 – Вікно програми WinBox з вибором пристрою

Після завантаження маршрутизатора в програмі WinBox у вкладці «Neighbors» ми бачимо наш пристрій. Натискаємо по ньому, авторизуємось користувач admin у полі входу, залишаємо поле пароля порожнім і натисніть кнопку підключення. Після цього автоматично відкриється меню QuickSet із налаштованим роутером Mikrotik.

Quick Set – це досить проста сторінка майстра налаштування для всіх пристроїв із заводською конфігурацією за замовчуванням. Пристрої, які не налаштовані, необхідно налаштувати вручну.

Розглянемо конфігурації, доступні в нашому роутері.

CPE – це клієнтський пристрій, який підключатиметься до пристрою точки доступу (AP). Дозволяє сканувати пристрої точки доступу у вашому регіоні.

PTP Bridge AP. Коли вам потрібно прозоро з'єднати два віддалених місця в одній мережі, вам потрібно налаштувати один пристрій у цей режим, а інший – у наступний режим (PTP Bridge CPE).

PTP Bridge CPE. Якщо вам потрібно прозоро з'єднати два віддалених місця в одній мережі, вам потрібно буде налаштувати один пристрій на цей режим, а інший – на попередній режим (PTP Bridge AP).

WISP AP подібні до режиму «Домашня точка доступу», але є більш досконалими та використовують стандартну термінологію, таку як SSID і WPA.

Home AP – сторінка конфігурації точки доступу завантажується за умовчанням, підходить для більшості домашніх користувачів. Надає менше варіантів і спрощену термінологію.

Home Mesh – цей режим потрібен для створення великих мереж Wi-Fi. Увімкніть сервер CAPSMAN у маршрутизаторі та передайте локальний інтерфейс WiFi під контроль CAPSMAN.

CAP – це пристрій точки доступу, яким керуватиме центральний сервер CAPSMAN. Він використовується, лише якщо налаштовано сервер CAPSMAN.

Нам потрібен режим Home Mesh.

Переходимо до налаштування точки доступу Wi-Fi.

У розділі Wireless зліва на вкладці «Quick Set» (рис. 3.9) вказуємо параметри Wi-Fi точки доступу.

Network Name – назва точки доступу. Наприклад School.

Band – стандарт, на якому працює точка доступу. Для сумісності зі старими бездротовими пристроями ми вибираємо 2 ГГц-b/g/n та новий стандарт 5 ГГц-ах .

Country – вибір країни. Нічого не змінюємо. У разі вибору України максимальна вихідна потужність буде знижена до 100 мВт.

Пароль WiFi – пароль для підключення до точки доступу WiFi. Для прикладу взяли пароль 00000000 (вісім нулів).

Рисунок 3.9 – Розділ «Wireless» у вікні Quick Set

Переходимо до налаштування Інтернету.

Рухаємось до розділу «Internet» вкладки «Quick Set» вгорі праворуч. Щоб налаштувати Інтернет для отримання адреси, у нас є 3 варіанти на вибір, розглянемо їх детальніше:

- Static – потрібно, якщо провайдер використовує статичні налаштування для підключення до мережі;
- Automatic – якщо інтернет-провайдер автоматично видає налаштування мережі через DHCP;
- PPPoE – потрібен, якщо ви використовуєте клієнтське з'єднання PPPoE. Для підключення необхідно мати логін і пароль.

Оскільки наш провайдер використовує статичні IP-адреси, ми наведемо приклад Static IP (рисунок 3.10). Далі ми маємо дані від провайдера, які ми заповнили у відповідні поля:

- IP-адреса – встановлюємо IP-адресу;
- Netmask – встановлюємо маску мережі;
- Gateway – встановлюємо адресу шлюзу;
- DNS-сервер – встановлюємо адресу DNS-сервера;
- MAC-адреса – якщо провайдер блокує доступ за MAC-адресою, введіть у цьому полі дозволену MAC-адресу.

Internet

Address Acquisition: ☒ Static ☐ Automatic ☐ PPPoE

IP Address: 178.218.78.52

Netmask: 255.255.255.0 (/24) ▼

Gateway: 178.218.78.1

DNS Servers: 1.1.1.1 ▲▼

8.8.8.8 ▲▼

8.8.4.4 ▲▼

MAC Address: 74:4D:28:80:52:5B

☒ Firewall Router

☒ MAC Server

☒ MAC Winbox

Рисунок 3.10 – Розділ «Internet» у вікні Quick Set

Налаштування сервера DHCP.

Протокол DHCP – це протокол клієнта або сервера, який автоматично надає вузол протоколу IP з його IP-адресою та інші пов'язані відомості про конфігурацію, такі як маска підмережі та шлюз за замовчуванням. Тож щоб роутер автоматично видавав мережеві налаштування для комп'ютерів та інших Wi-Fi пристроїв, а також дозволяв вихід в Інтернет, необхідно налаштувати DHCP-сервер в розділі локальної мережі (рис. 3.11):

- IP Address – IP-адреса роутера;
- Netmask – вказує маску мережі 255.255.255.0 (/24);
- DHCP Server – встановлюємо цей прапорець, щоб увімкнути сервер DHCP;
- DHCP Server Range – діапазон IP-адрес, які будуть призначені підключеним пристроям (наразі ми залишили його без змін);
- NAT – ставимо цей прапорець, щоб дозволити підключеним пристроям доступ до Інтернету.

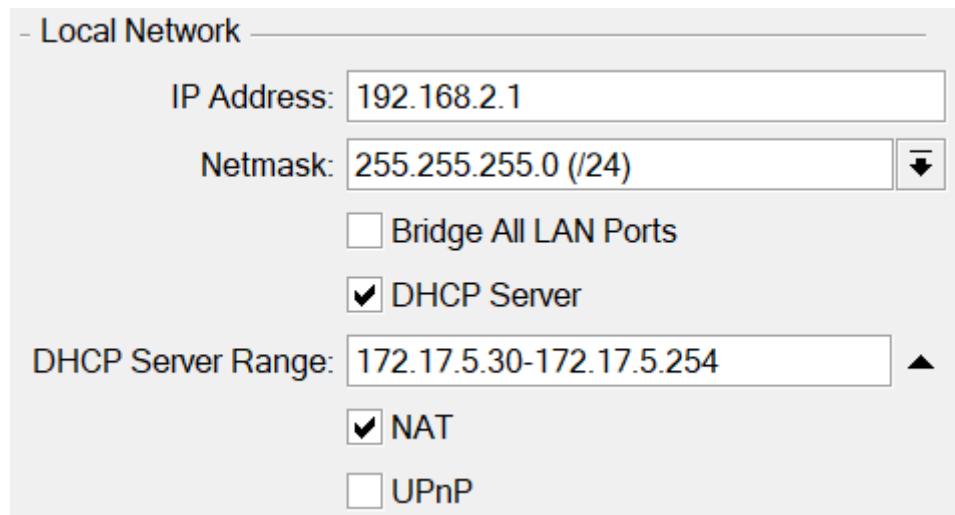


Рисунок 3.11 – Розділ «Local Network» в Quick Set

Встановлення пароля.

Встановлюємо пароль для входу в налаштування Mikrotik. Щоб ніхто, крім адміністратора, не міг увійти в налаштування роутера MikroTik та вносити зміни, необхідно встановити пароль.

Для цього в розділі «System» введіть новий пароль у поле «Password» (рисунок 3.12) та підтверджуємо його в полі «Confirm Password».

Після введення налаштувань натискаємо на кнопку Apply Configuration в нижньому правому куті, щоб застосувати всі налаштування.

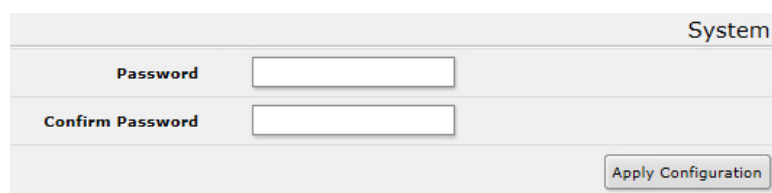


Рисунок 3.12 – Розділ System у вікні «Quick Set»

Після застосування налаштувань для отримання доступу до пристрою необхідно повторно авторизуватися і ввести логін і пароль. Ім'я для входу за замовчуванням - admin.

3.5 Створення безшовної мережі Wi-Fi

CAPsMAN – це менеджер системи керованої точки доступу. Суть технології полягає в тому, щоб покрити велику територію однією мережею Wi-Fi за допомогою кількох точок доступу та безшовного перемикається з однієї точки на іншу без втрати мережі. Справа в тому, що для розгону системи не потрібне додаткове обладнання – будь-яка точка мережі може виконувати роль контролера, за допомогою якого можна керувати всіма іншими точками. Власне, умовою використання цієї технології є наявність бездротових пристроїв Mikrotik з RouterOS v6.11 і вище, а CAPsMAN v2 доступний в RouterOS v6.22 і вище.

Підключаємось до головного роутера який буде у ролі контролера інших точок що розташований у кабінеті «Room17», та додамо частотні канали в нашу мережу, налаштування знаходяться в меню CAPsMAN->Channels.

Для цього виконаємо такі команди:

```
/caps-man channel add band=2ghz-b/g/n name=channel-24
```

```
/caps-man channel add band=5ghz-a/n/ac/ax name=channel5
```

```
/caps-man datapath add bridge=bridge-1 client-to-client-forwarding=yes  
name=\datapath
```

Local Forwarding – трафік від клієнтів оброблятиметься контролером CAPsMAN (без встановленого прапорця) або самою точкою доступу (з активним прапорцем). Це можна використати для розвантаження центрального маршрутизатора, але варто враховувати продуктивність точки доступу Wi-Fi для обробки великої кількості трафіку та розташування брандмауера.

Client To Client Forwarding – дозволяє обмінюватися трафіком між клієнтами. Наприклад: в гостьовій мережі такий обмін повинен бути заборонений, а в локальній - дозволений.

Перейдемо до меню CAPsMAN->Security Cfg та налаштуємо параметри безпеки. Для цього скористаємося командою:

```
/caps-man security add authentication-types=wpa2-psk encryption=aes-ccm\group-key-update=1h name=security passphrase=123456678
```

Вкладка CAPsMAN->Configurations містить загальні параметри конфігурації. Виконуємо такі команди:

```
/caps-man configuration add channel=channel-24 datapath=datapath mode=ap name=\cfg-24 rx-chains=0,1,2,3 security=security \ssid=Mikrotik tx-chains=0,1,2,3
```

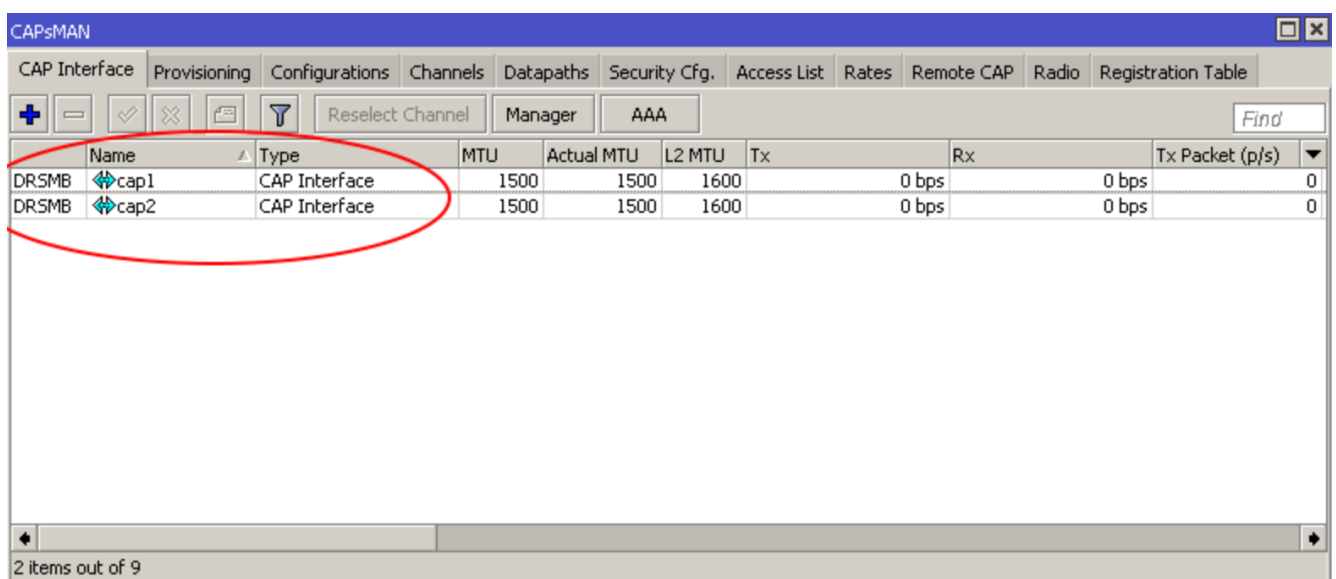
```
/caps-man provisioning add action=create-enabled hw-supported-modes=an,ac,ax\master-configuration=cfg-5
```

Головний роутер налаштовано, далі слід підключитись до всіх інших роутерів які будуть виступати у ролі точки доступу та виконуємо наступні дії. Підключимося до точки доступу за допомогою Winbox та переходимо до вкладки Wireless->WiFi Interfaces де виконуємо команду:

```
/interface wireless cap set bridge=bridge caps-man-addresses=127.0.0.1 enabled=yes interfaces=\wlan1,wlan2
```

Правило в Provisioning Action = create dynamic enabled створить віртуальні інтерфейси на всіх налаштованих точках доступу.

Підключені пристрої відображаються на головному роутері у вкладці CAPsMAN->CAP Interface (рис. 3.13).



Name	Type	MTU	Actual MTU	L2 MTU	Tx	Rx	Tx Packet (p/s)
DR5MB cap1	CAP Interface	1500	1500	1600	0 bps	0 bps	0
DR5MB cap2	CAP Interface	1500	1500	1600	0 bps	0 bps	0

2 items out of 9

Рисунок 3.13 – Приклад підключених пристроїв у вікні «CAP Interface»

4 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГІЇ 802.11AX

4.1 Аналіз програмного забезпечення для дослідження

TamoGraph Site Survey - потужний та зручний інструмент для збору, візуалізації та аналізу даних у мережах Wi-Fi стандарту 802.11 a/b/g/n/ac/ax. Для впровадження та експлуатації бездротових мереж потрібні професійні програмні продукти, які дозволяють значно спростити виконання таких складних та трудомістких завдань як побудова карт покриття, аналіз інтерференції та рівня сигналу, розподіл Wi-Fi-каналів тощо. Саме для вирішення цих проблем і призначений TamoGraph.

Розглянемо основні функції:

- пасивні та активні дослідження;
- радіочастотне планування – створення віртуальних моделей та планування своєї майбутньої WLAN;
- комплексний аналіз WLAN із легкою для розуміння візуалізацією рівнів сигналу, перешкод, зон покриття точки доступу, швидкості передачі даних, проблем з мережею;
- автоматичне визначення розміщення точки доступу;
- детальна інформація по кожній точці доступу (канал, максимальна швидкість передачі даних, провайдер, тип шифрування);
- можливість використання GPS для роботи на вулиці;
- повна підтримка мереж 802.11ax, а також 802.11a/b/g/n/ac;
- детальні звіти у форматах PDF, HTML та ODT (Microsoft Word).

Великі офіси компаній чи банків, готелі, кафе - скрізь, де вже використовується або планується розгортати Wi-Fi мережу, там TamoGraph допоможе суттєво скоротити час та витрати на планування та обслуговування мережі, збільшить її продуктивність, розширить покриття, можливо навіть без придбання додаткового обладнання. Дозволяє проводити реактивні, проактивні та прогнозні дослідження.

На прикладі даного програмного продукту, подивимося рівень сигналу в приміщенні, що розглядається. Для цього потрібно завантажити план приміщення, вказати радіус зони покриття однієї точки доступу, розставити точки доступу відповідно до плану розміщення. Слід відредагувати план приміщення відповідно до матеріалу виконання будівлі, а також його розмірів. Наприклад, такі елементи як стіни, перегородки, вікна, двері та інше.

4.2 Налаштування програми TamoGraph Site Survey

Спочатку виберемо тип середовища для вимірювання параметрів. У списку «Вибір типу середовища» вікна «Майстер проекту» вибрали приміщення із середнім ослабленням сигналу (офіс з перегородками), як показано на рисунку 4.1. Далі необхідно завантажити план нашого навчального закладу (рис. 4.2.).

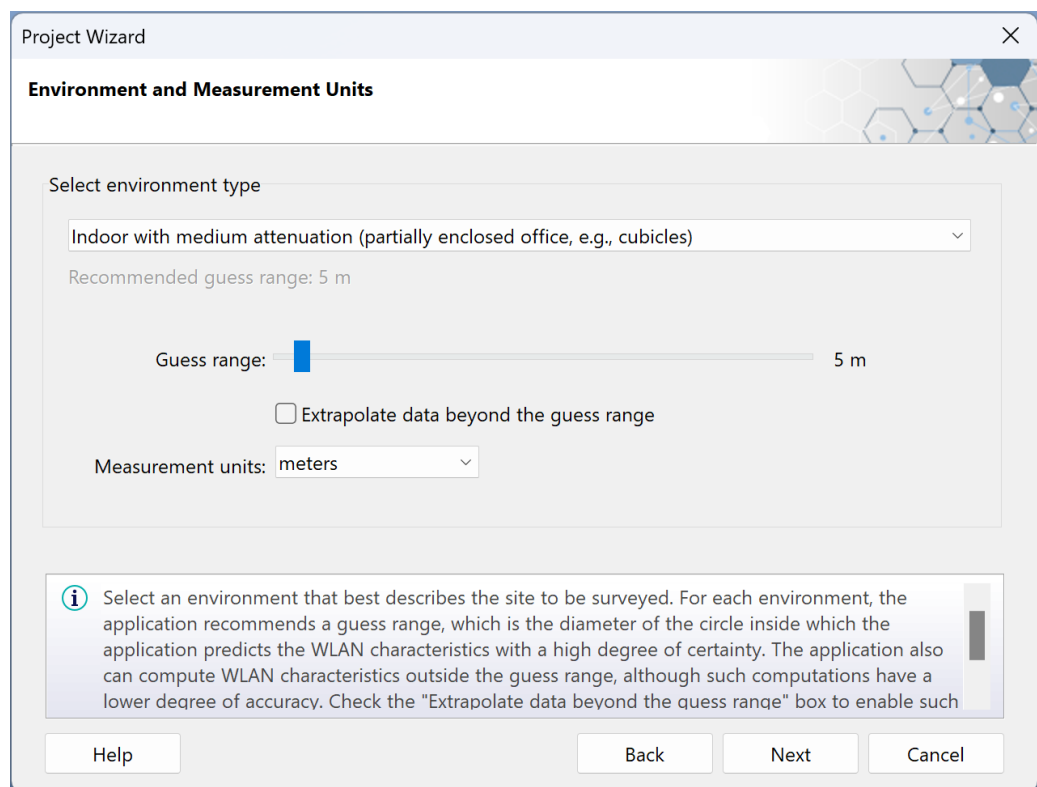


Рисунок 4.1 – Вибір типу середовища у вікні «Майстер проекту»

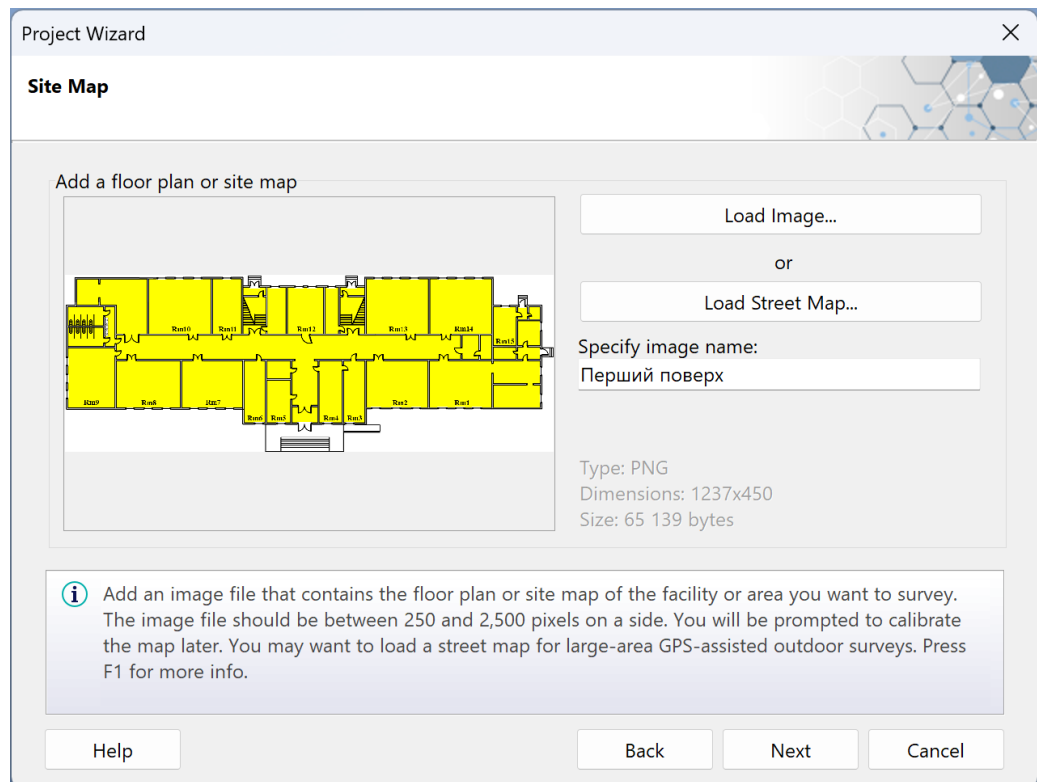


Рисунок 4.2 – Завантаження плану будівлі у вікні «Майстер проекту»

Розмір найдовшої сторони зображення має бути від 250 до 2500 пікселів (звичайно, це стосується лише растрових форматів, оскільки векторні зображення (наприклад, DWG) не мають розміру пікселів).

Після створення проекту нам запропоновано відкалібрувати план поверху або карту об'єкта, що перевіряється. Процес калібрування потрібен, щоб «повідомити» програмі масштаб карти. Щоб відкалібрувати карту в цьому режимі, нам потрібна інформація про відстань між будь-якими двома точками на карті. Наприклад, можна виміряти відстань між двома стінами або вікнами.

Скористаємося функцією «Калібрування», на поточному поверсі плану будівлі та встановлюємо для нього відповідні розміри. У нашому випадку масштаб будівлі отримано за допомогою сервісу Google Maps, на зображенні карти виміряли довжину будівлі інструментом «Вимірювання відстані» (рис. 4.3). Ми виміряли довжину будівлі та отримали значення 64 метри, ввели його у відповідне вікно та натиснули кнопку «Прийняти».

Повторюємо також ці шаги для другого поверху будівлі.

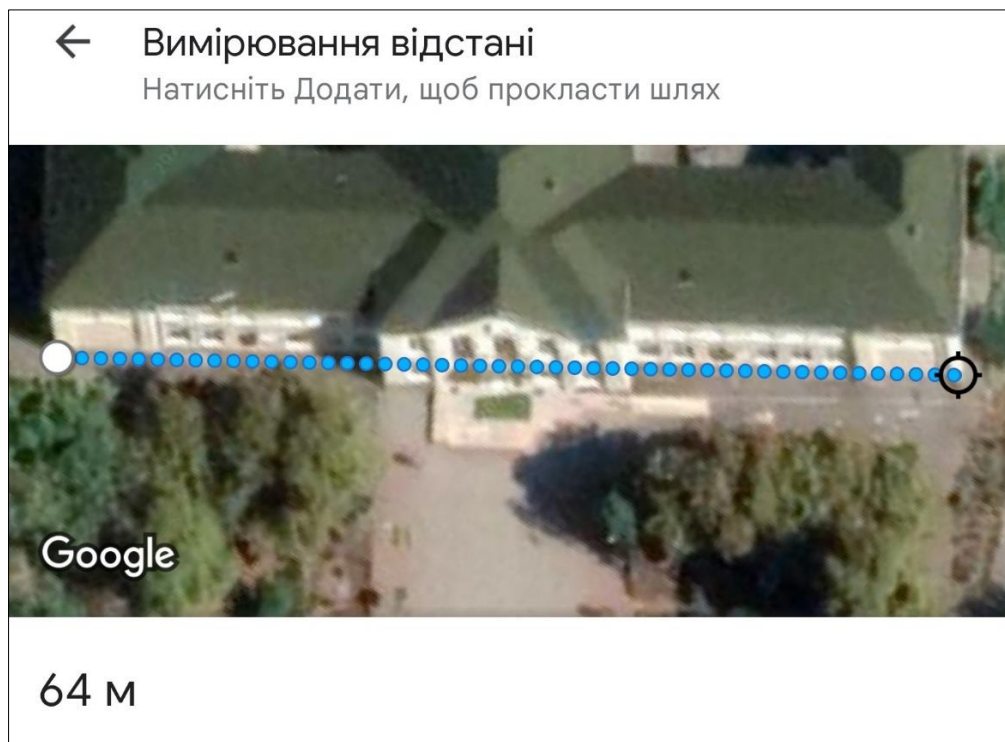


Рисунок 4.3 – Вимірювання відстані в «Google Maps»

Додавання стіни та інших перешкод. Щоб додати стіни чи інші перешкоди, як-от двері чи вікна, на плані поверху, скористаємося інструментом малювання стін та виберемо попередньо встановлений тип, наприклад «Цегляна стіна» або «Внутрішні офісні вікна». Програмне забезпечення TamoGraph Site Survey має багато варіантів матеріалів і товщини стін, вікон і дверей, кожен з яких має власний рівень поглинання. Можливо вказати власне значення падіння. Його можна знайти, вимірявши потужність сигналу з кожного боку перешкоди та обчисливши різницю. Вимірювання можна проводити за допомогою TamoGraph або будь-якого іншого аналізатора Wi-Fi, наприклад CommView для Wi-Fi.

Колір – це довільний колір, який використовується для відображення перешкод на плані поверху.

Оскільки була визначена внутрішня цегляна стіна товщиною 9 см (відмічено червоним кольором), то для стандартного фасаду буде використана цегляна стіна товщиною в 45 см (відмічено синім кольором). Крім того, вибір падає на зовнішні подвійні вікна 2,5 см та дерев'яні двері 4,5 см (відмічено жовтим кольором). Результат розташування перешкод на рисунку 4.4 та 4.5.

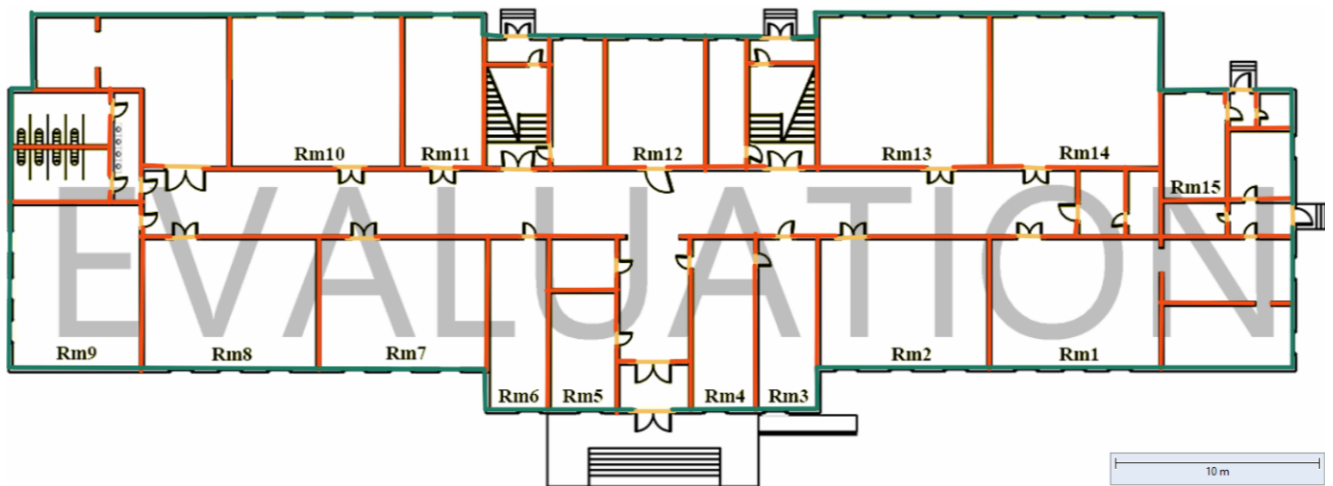


Рисунок 4.4 – Результат розташування перешкод на першому поверсі

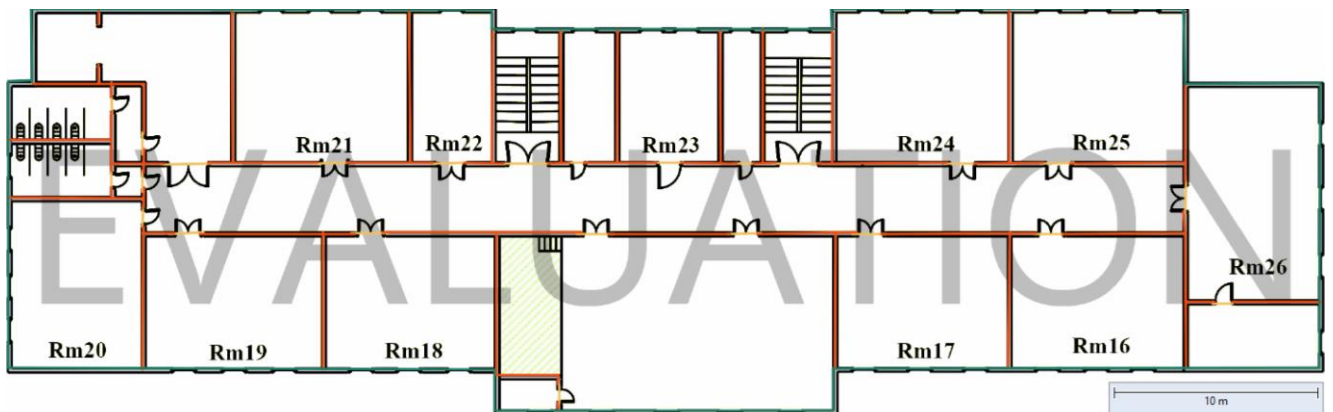


Рисунок 4.5 – Результат розташування перешкод на другому поверсі

Вирівнювання поверхів. При плануванні мережі для багатоповерхового будинку віртуальна модель повинна враховувати можливі «витоки» сигналів на суміжні поверхи. Як правило, зв'язок із суміжними поверхами забезпечує точка доступу, розташована поверхом вище або нижче (зазвичай нижче, оскільки точка доступу зазвичай розташована на стелі, а отже, ближче до поверху вище). За допомогою TamoGraph ми можемо створювати й аналізувати багатошарові моделі.

Відкриваємо «Floor Manager» де додаємо залізобетонне перекриття між поверхами з характеристиками загасання 20 дБ на 2,4 ГГц і 30 дБ на 5 ГГц, а також дах із загасанням 15 дБ на 2,4 ГГц і 23 дБ загасання на 5 ГГц. Результат налаштування показано на рисунку 4.6.

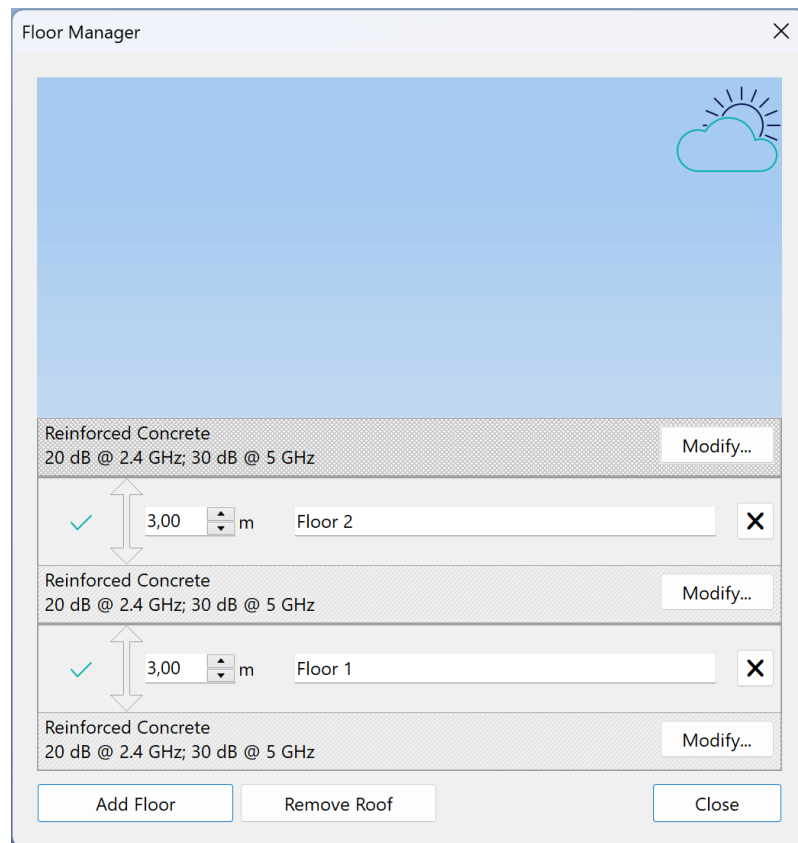


Рисунок 4.6 – Результат налаштувань у вікні «Floor Manager»

4.3 Результат моделювання

У цій роботі для кожного діапазону частот аналізуються три випадки для трьох показників, такі як:

- рівень сигналу;
- відношення сигнал/шум;
- прогнозована фізична швидкість.

Спочатку розглянемо випадок коли ввімкнений лише один роутер у діапазоні 5 ГГц, та порівняємо з діапазоном 2.4 ГГц щоб візуально оцінити різницю в рівні сигналу.

На рисунку 4.7 та 4.8 показано порівняння площі та рівня сигналу однієї точки що розташована у кабінеті «Room1» в частотному діапазоні 2.4 та 5 ГГц.

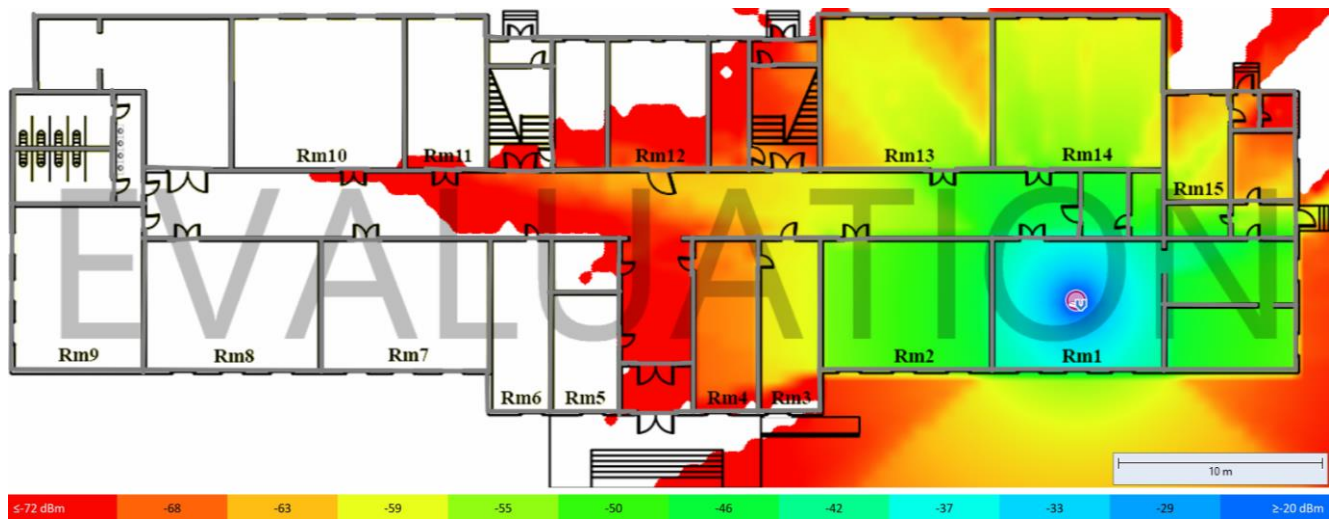


Рисунок 4.7 – Рівень сигналу одного роутера в діапазоні 2.4 ГГц



Рисунок 4.8 – Рівень сигналу одного роутера в діапазоні 5 ГГц

За даними зображення можна візуально визначити, як швидко згасає сигнал на частоті 5 ГГц. Однак, з одного боку, перевага 2,4 ГГц у цій області компенсується сильним блокуванням у цьому діапазоні. З іншого боку, покриття мереж 5 ГГц легко розширити шляхом встановлення додаткових точок доступу.

Рівень сигналу або карта покриття - це одна з найважливіших характеристик, що впливає на продуктивність мережі Wi-Fi.

На рисунку 4.9 та 4.10 показано рівень сигналу усіх точок доступу у частотному діапазоні 5 ГГц на першому та другому поверсі згідно плану розміщення мережевого обладнання.

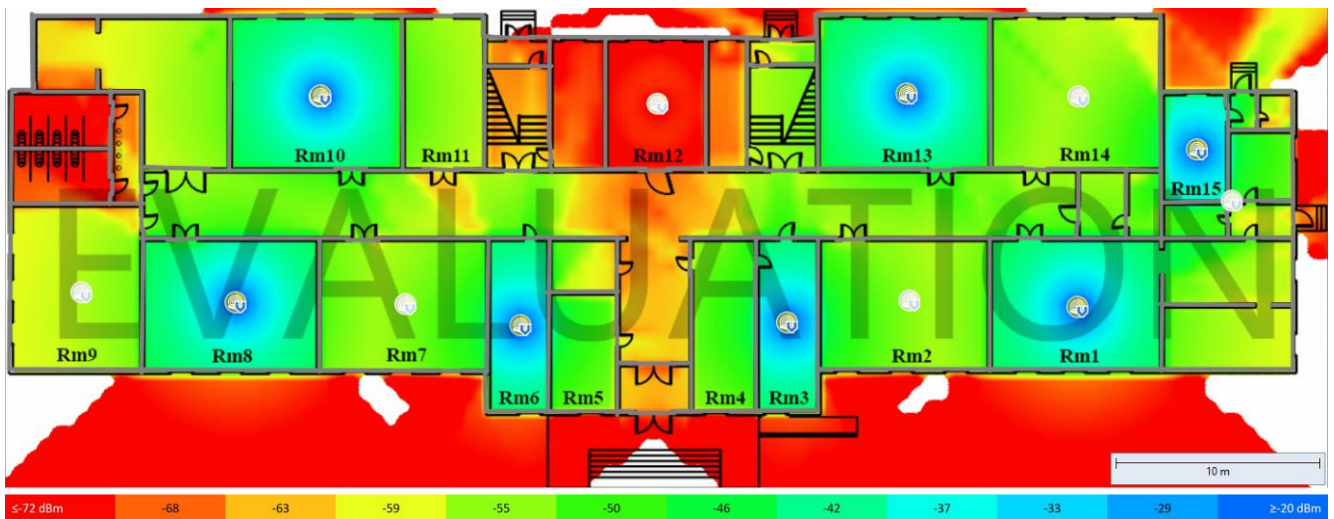


Рисунок 4.9 – Рівень сигналу на першому поверсі в діапазоні 5 ГГц

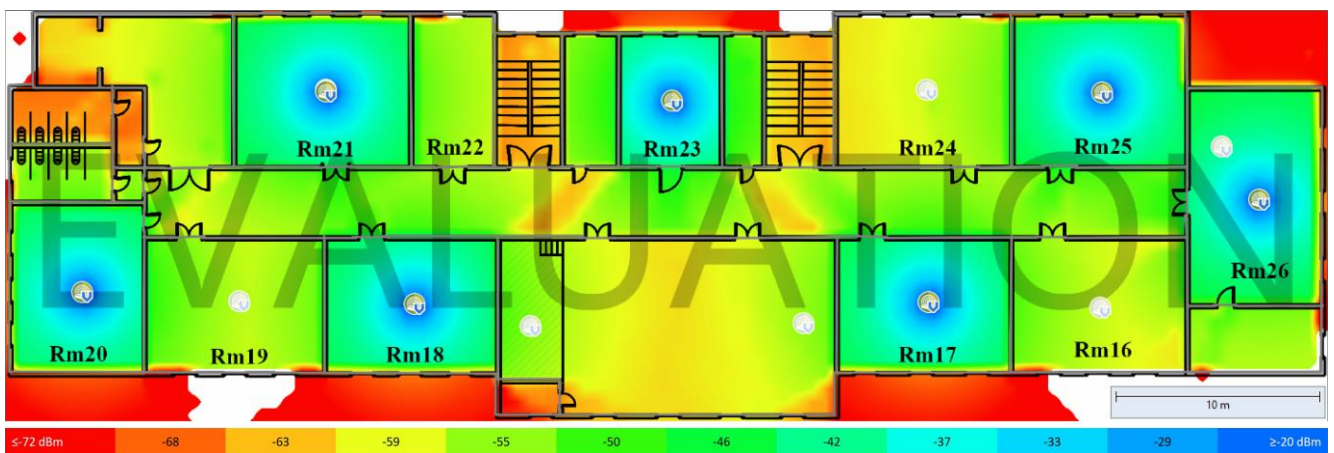


Рисунок 4.10 – Рівень сигналу на другому поверсі в діапазоні 5 ГГц

Таким чином, зони з найнижчою потужністю сигналу - кабінет «Room12» та туалет, але це не найважливіші місця для додавання додаткових точок доступу.

Після налаштування рівня сигналу, перевіримо рівень сигнал/шум. Ця характеристика вимірюється в децибелах (dB) і вказує на те, наскільки рівень сигналу вище рівня шуму. Шумом вважаються джерела радіохвиль, які не є частиною стандарту 802.11. У зонах із низьким співвідношенням сигнал/шум клієнтські пристрої не можуть зв'язатися з точкою доступу. У типовому середовищі рівень шуму становить приблизно -90 дБм.

На рисунку 4.11 та 4.12 показано відношення сигнал/шум для даних точок доступу на першому та другому поверсі.

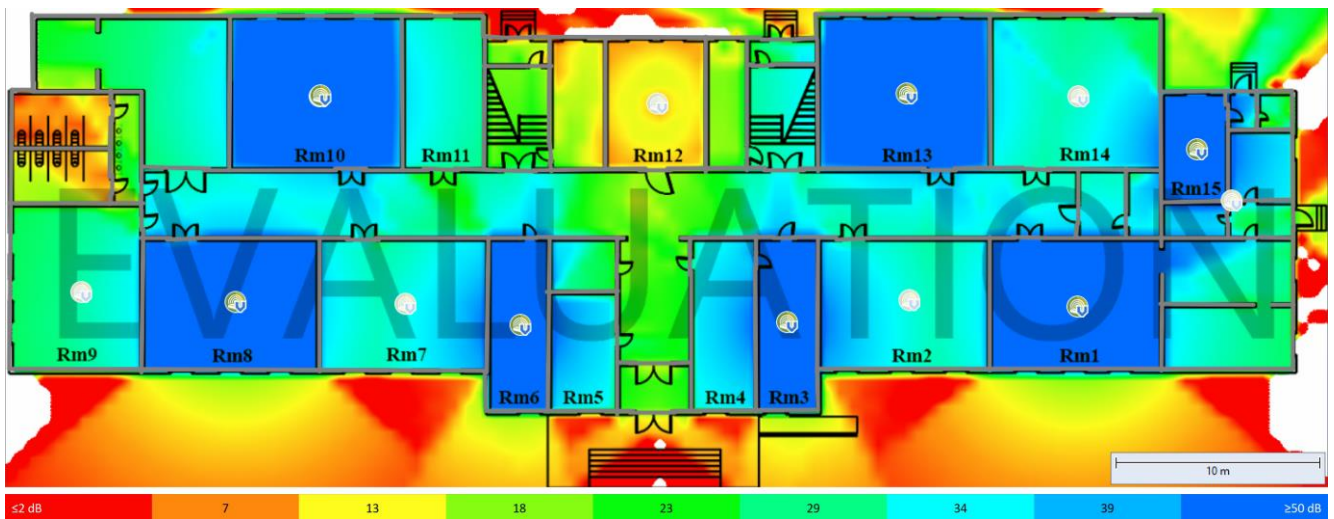


Рисунок 4.11 – Відношення сигнал/шум на першому поверсі, діапазон 5 ГГц

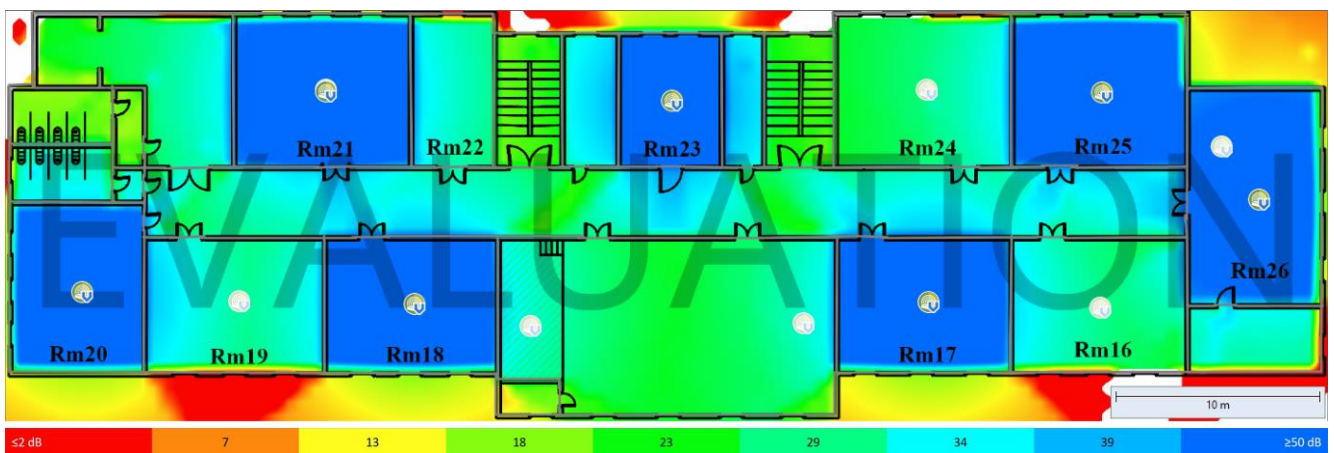


Рисунок 4.12 – Відношення сигнал/шум на другому поверсі, діапазон 5 ГГц

На рисунку 4.13 та 4.14 зображено прогнозовану фізичну швидкість для даних точок доступу на двох поверхах будівлі.

Фізична швидкість безпосередньо пов'язана з пропускнуою здатністю, яка є середньою швидкістю, з якою клієнт обмінюється даними прикладного рівня (наприклад, файлами) з точкою доступу. Пропускна здатність завжди нижча за фізичну швидкість, зазвичай перевищує 50%, з багатьох причин, таких як повторна передача (дублювання) даних і надсилання технічних даних, які не несуть корисного навантаження (заголовки пакетів, характеристики протоколу передачі даних). Низька фізична швидкість завжди означає низьку пропускну здатність, що призводить до низької продуктивності мережі.

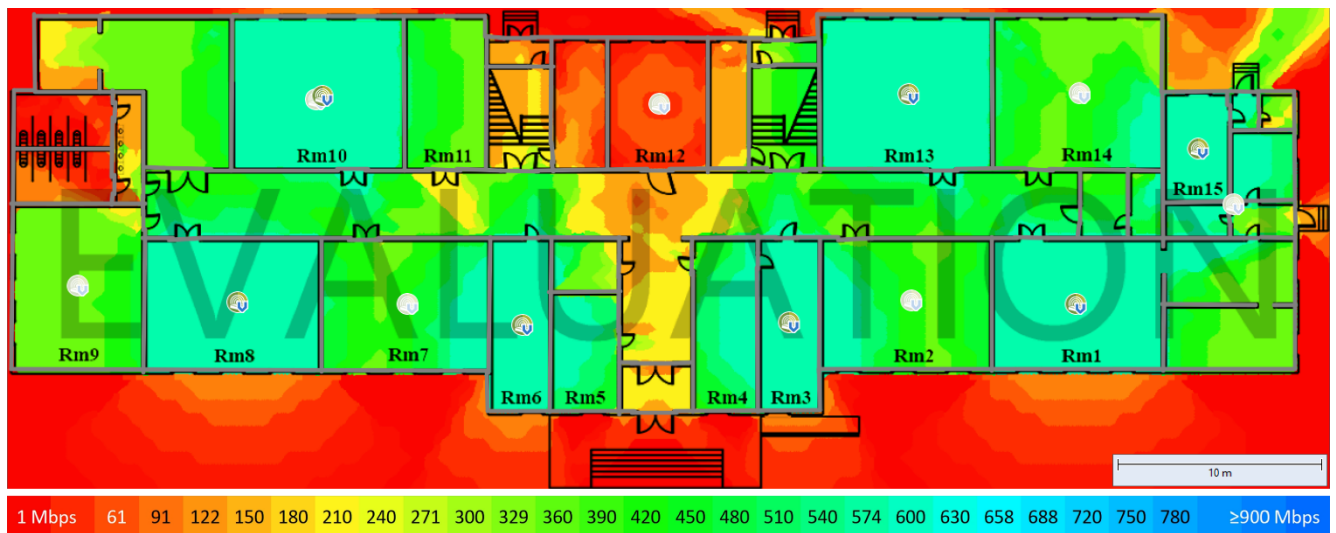


Рисунок 4.13 – Прогнозована швидкість на першому поверсі, діапазон 5 ГГц

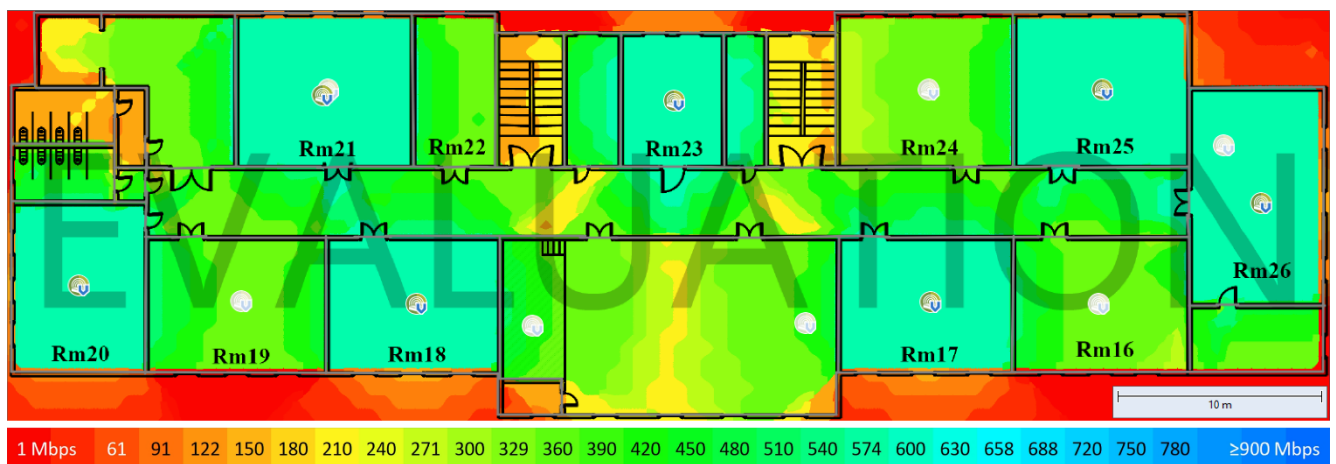


Рисунок 4.14 – Прогнозована швидкість на другому поверсі, діапазон 5 ГГц

Далі розглянемо випадок точок доступу в діапазоні частот 2,4 ГГц. Цей діапазон в даний час є найбільш використовуваним. Кількість пристроїв, що працюють в цьому діапазоні частот, дійсно величезна. Тому в густонаселених будинках з десятками точок доступу часто спостерігається ослаблення сигналу. Зазвичай це пов'язано з тим, що використовується той самий канал зв'язку. У порівнянні з 17 каналами в діапазоні частот 5 ГГц і відносно низьким рівнем використання, діапазон частот 2,4 ГГц має лише 13 каналів і велику кількість користувачів. На рисунку 4.15 та 4.16 проілюстровано співвідношення сигнал/інтерференція точок доступу на першому та другому поверсі. Цей графік чудово показує вплив маршрутизатора на один канал.

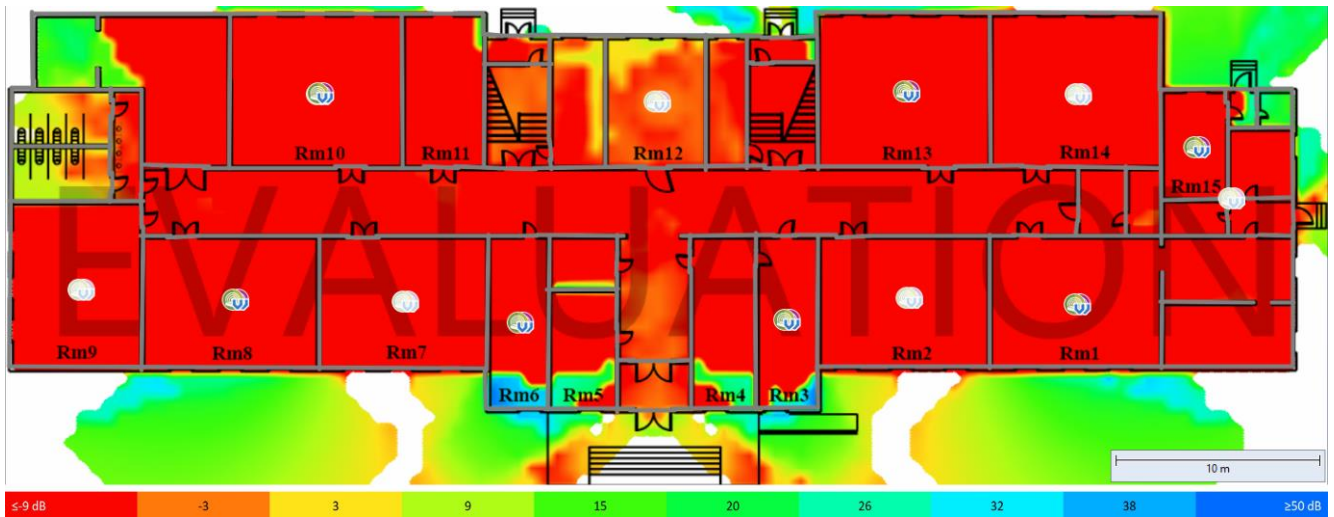


Рисунок 4.15 – Відношення сигнал/інтерференція точок доступу на одному каналі першого поверху

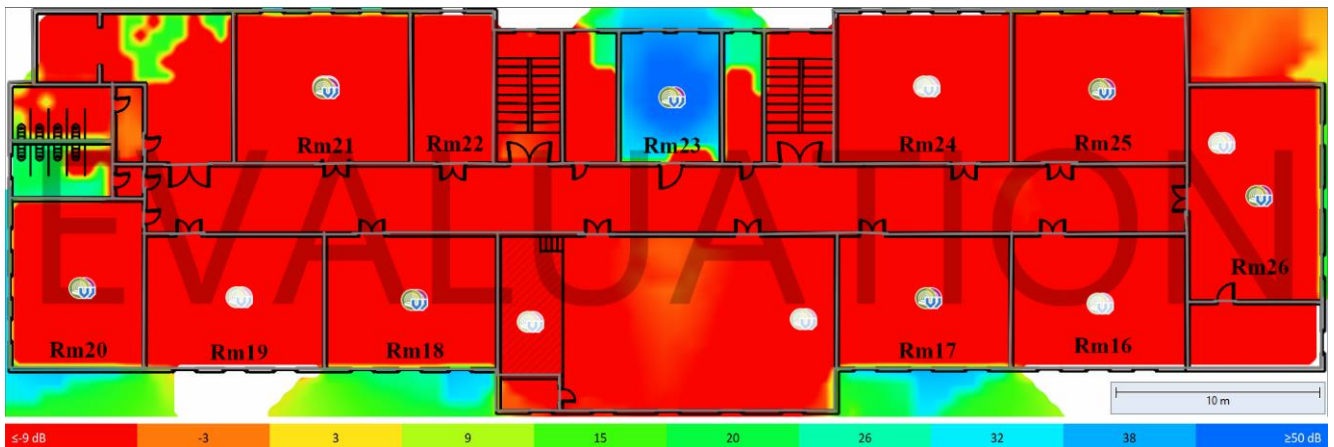


Рисунок 4.16 – Відношення сигнал/інтерференція точок доступу на одному каналі другого поверху

На рисунках чітко видно вплив роутерів на один канал. Перешкоди найвищі, коли «жертва» та джерело інтерференції працюють на тому самому каналі. Для частотного діапазону 2,4 ГГц, де частота каналу перекривається, перешкоди сусідніх каналів також досить значні для 1-2 каналів один від одного, і перешкоди зникають, якщо канали точки доступу розділені 5 або більше каналами. У діапазоні 5 ГГц немає інтерференції суміжних каналів.

На рисунках 4.17 та 4.18 показано рівень сигналу точок доступу в діапазоні 2,4 ГГц на першому та другому поверсі.

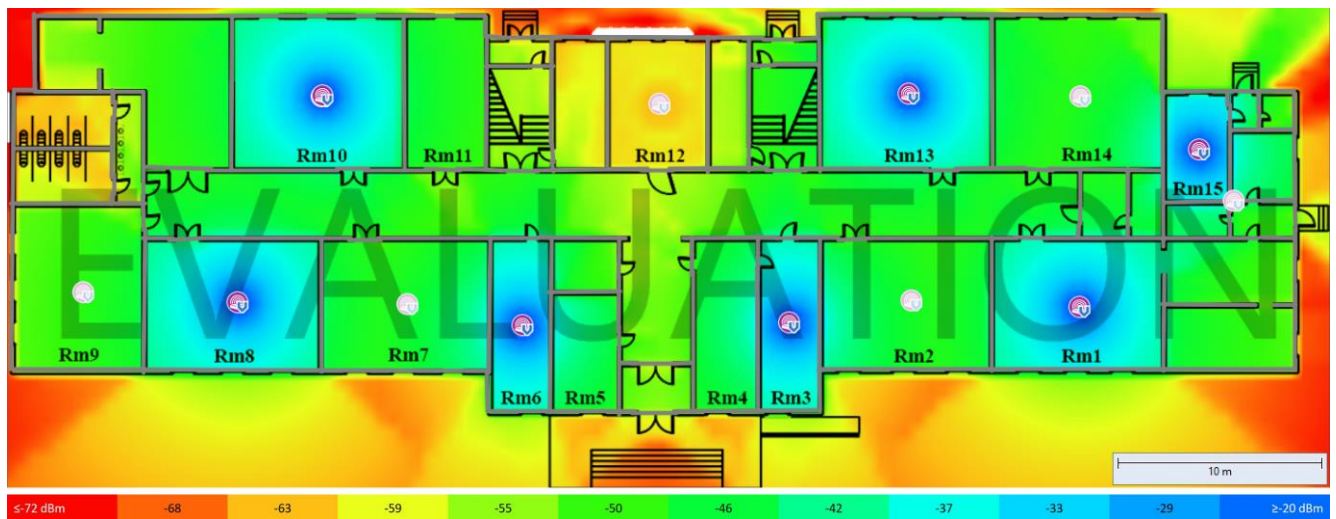


Рисунок 4.17 – Рівень сигналу на першому поверсі в діапазоні 2.4 ГГц

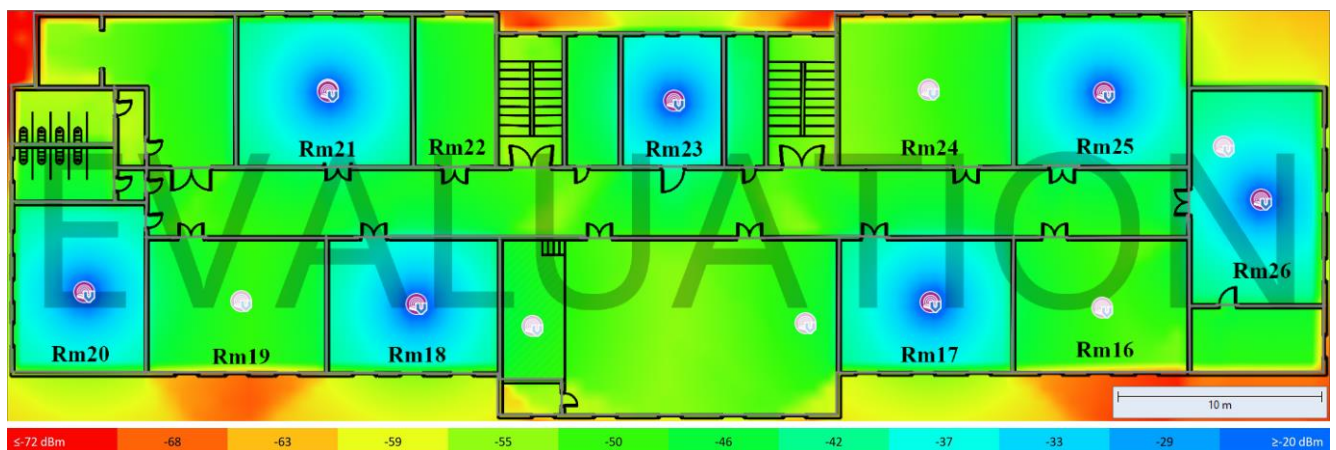


Рисунок 4.18 – Рівень сигналу на другому поверсі в діапазоні 2.4 ГГц

В разі використання частотного діапазону 2.4 ГГц, зони з найнижчою потужністю сигналу - кабінет «Room12» та туалет, вже мають рівень сигналу близько до середнього (в порівнянні з 5 ГГц).

Підіб'ємо підсумки дослідження. Якщо взяти офіційні характеристики стандарту 802.11ax і приблизно змодельовані характеристики точок доступу, то вони сильно відрізняються. Візьмемо максимальну фізичну швидкість передачі 9608 Мбіт/с та фізичну швидкість моделі 600 Мбіт/с, буде різниця в 16 разів. Слід врахувати, що точка доступу досягає максимальної фізичної швидкості з частотним діапазоном 5 ГГц, 8 просторовими потоками (MIMO 8x8), шириною каналу 160 МГц і модуляцією порядку 1024QAM.

Технологія MIMO - можливість одночасної передачі декількох потоків даних в одному каналі вперше з'явилася в 802.11n.

Але є нюанси:

- MIMO 8x8 - клієнтський пристрій взагалі не підтримує;
- MIMO 4x4 - підтримується невеликою кількістю пристроїв;
- MIMO 3x3 - підтримка кращих ноутбуків;
- MIMO 2x2 – підтримується кращими планшетами та смартфонами;
- SISO 1x1 – підтримується більшістю пристроїв.

За середнє беремо пристрої, які підтримують MIMO 2x2, тобто шляхом підрахунку можна визначити початкову, після першого скринінгу, фізичну швидкість: $9608:8 = 1201$ Мбіт/с (базова швидкість для SISO) і множимо на 2 просторових потоки, отримуємо $1201 \times 2 = 2402$ Мбіт/с.

Укупі з шириною каналу все не так просто. Стандарт 802.11ax дійсно допускає ширину каналу 160 МГц, але навіть ширина каналу 80 МГц використовується рідко, тому що перешкоди можуть порушити роботу всіх сусідніх мереж і самого користувача. 40 МГц дозволено в діапазоні 5 ГГц лише за сприятливих умов мережі та кількох суміжних мереж. Найпоширенішим вибором є використання каналів 20 МГц. Ширина каналу, яка використовується в симуляції, становить 40 МГц, тому фізична швидкість розраховується наступним чином: коефіцієнти для ширини каналу 40, 80 і 160 МГц дорівнюють 2,1, 4,5 і 9,0 відповідно.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено детальний аналіз розвитку технології IEEE 802.11 та безпроводових Wi-Fi технологій в цілому. Досліджено актуальні на сьогодні методи та алгоритми оптимізації технології передачі даних у безпроводових локальних мережах та визначено властивості, які дозволяють забезпечити необхідні вимоги для систем доступу на базі IEEE 802.11ax.

Найпоширенішим стандартом сімейства IEEE 802.11 є специфікації 802.11a/b/g/n/ac. Що стосується стандарту 802.11ax, то це нова технологія, яка використовується мінімально, але забезпечує найвищу швидкість передачі даних серед усіх стандартів 802.11.

Програмне забезпечення TamoGragh Site Survey ідеально підходить для попереднього моделювання майбутніх мереж Wi-Fi. Для цього в програмі є все, що вам потрібно, від роботи з вашими планами будівлі до отримання приблизної фізичної швидкості готової системи.

Діапазони 2,4 та 5 ГГц мають різні робочі цілі. Точки доступу в діапазоні частот 2,4 ГГц мають більше покриття і відносно нижчу швидкість передачі даних (порівняно з діапазоном 5 ГГц). Крім того, перешкоди у вигляді тонких стін мало впливають на швидкість передачі та рівень сигналу.

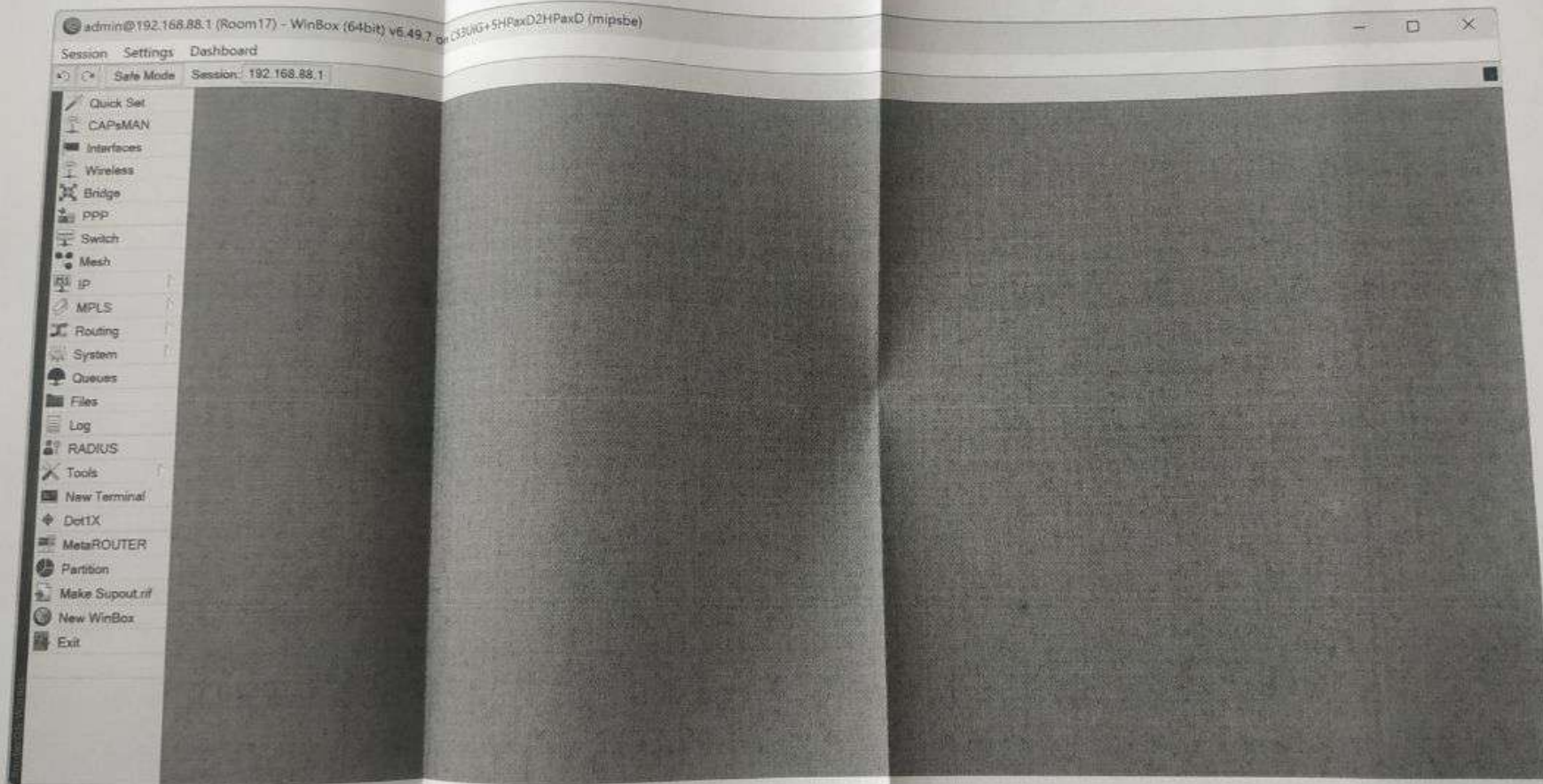
З іншого боку, точки доступу в діапазоні 5 ГГц мають невелике покриття та дуже високу швидкість передачі. Він дуже чутливий навіть до тонких стінок, що може призвести до погіршення рівня сигналу та падіння швидкості.

Досліджено та розроблено робочий проект безпроводової мережі, що може бути використаний в навчальному закладі для реалізації високошвидкісної мережі доступу за технологією базі IEEE 802.11ax.

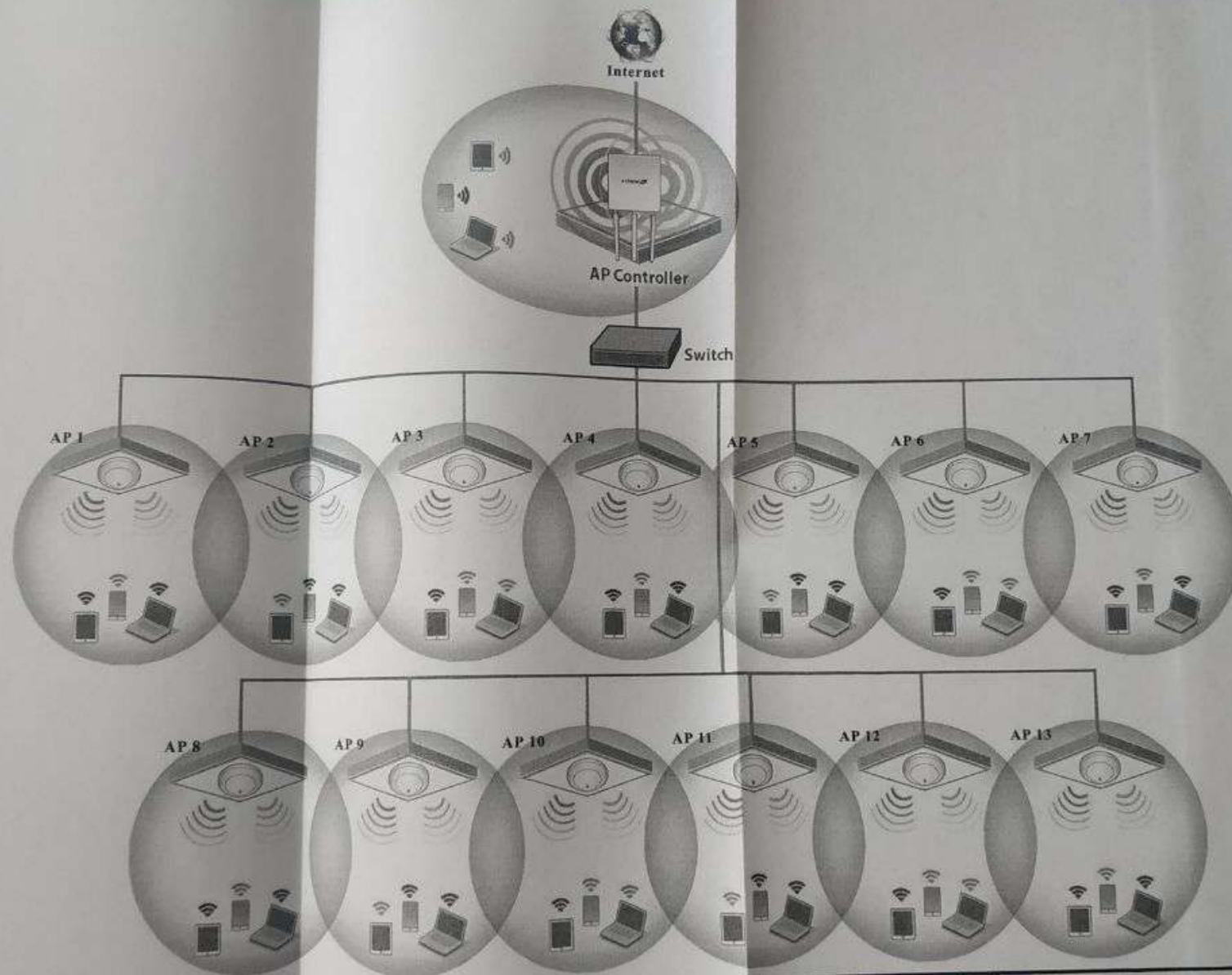
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Історія створення комп'ютерних мереж // Кафедра ІТО ЗОІППО Школи сучасних знань: вебсайт. URL: http://www.zhu.edu.ua/mk_school/mod/page/view.php?id=14589 (дата звернення: 20.09.2022).
2. Болілий В.О., Котяк В.В. Комп'ютерні мережі. Навчальний посібник / В.О. Болілий, В.В. Котяк – Кіровоград: ЦОП Авангард, 2008.– 146 с
3. Wi-Fi. Бездротова мережа / Джон Росс; пер. з англ. В.А. Ветлужских. - М .: НТ Пресс, 2007. - 320 с.
4. Мережі IEEE 802.11. URL: www.rsasecurity.com/rsalabs/technotes/wep-fix.html (Дата звернення: 10.10.22).
5. Коломoeць Г.П. Організація комп'ютерних мереж: навчальний посібник. Запоріжжя КПУ, 2012. – 156 с.
6. Макаренко В. В. 802.11ах-нова версія стандарту високошвидкісної системи зв'язку Wi-Fi, Електронні компоненти та системи, масовий технічний журнал. – 2017 – с. 44.
7. Стандарт 802.11а. URL: http://kunegin.com/ref7/wifi/80211a_1.htm (Дата звернення: 13.10.22).
8. Стандарт IEEE 802.11g. URL: http://kunegin.com/ref7/wifi/80211g_1.htm (Дата звернення: 15.10.22).
9. Макаренко В. В. Особливості стандарту бездротового свята IEEE 802.11ac (Wi-Fi) / Електронні компоненти та системи, №7, 2012. с.28-35.
10. Стандарт 802.11ах: WiFi нового покоління. URL: <http://ru.pcmag.com/feature/29268/standart-80211ax-wifi-novogo-pokoleniia> (Дата звернення: 20.10.22).
11. Wiki Mikrotik. 2020. Manual: CAPsMAN. URL: <https://wiki.mikrotik.com/wiki/Manual:CAPsMAN> (Last accessed: 11.10.2022).

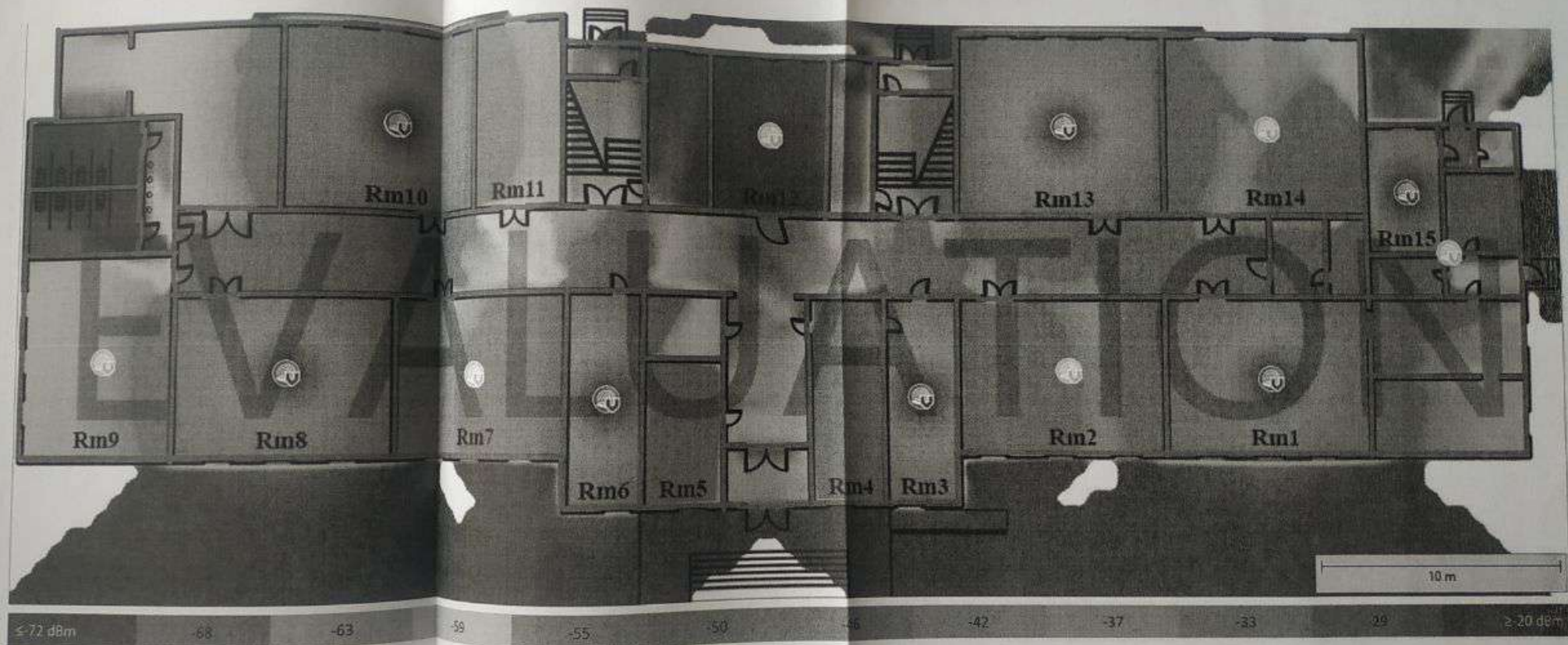
12. Giuseppe Bianchi, Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function/ Giuseppe Bianchi // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2000. – вип. 18 – №. 3. – стор. 1055 – 1067.
13. Lazebnyi V. S. Estimation of probabilistic processes in wireless networks of 802.11 standard/ V. S. Lazebnyi, Ch. Yin // Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2017. – №5. – с. 47-53.
14. Wiki Mikrotik. 2020. Manual: Quickset. URL: <https://wiki.mikrotik.com/wiki/Manual:Quickset> (Last accessed: 21.10.2022).
15. IEEE Std 802.11, 2007 Edition, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification. – 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA, June 2007. – 1232 p.
16. Вишняк А. В. Експериментальне дослідження параметрів каналу передавання мережі Wi-Fi./ А. В. Вишняк, В. С. Лазебний // Тези доповідей студентів та аспірантів, 2018.
17. Subnetwork Access Protocol. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Subnetwork_Access_Protocol (Дата звернення: 03.10.22).
18. Мережі IEEE 802.11. URL: www.rsasecurity.com/rsalabs/technotes/wep-fix.html (Дата звернення: 13.10.22).
19. KEENETIK. Коефіцієнти згасання сигналу Wi-Fi під час проходження через різні середовища. URL: <https://help.keenetic.com/hc/ua/articles/213968869-Коефіцієнти-загасання-сигналу-Wi-Fi-при-проходженні-через-різні-середовища> (дата звернення 26.10.2022)
20. Пілінський В. В. Технічна електродинаміка та поширення радіохвиль. Навчальний посібник з грифом НТУУ «КП». К.: Кафедра, 2014. –334 с.



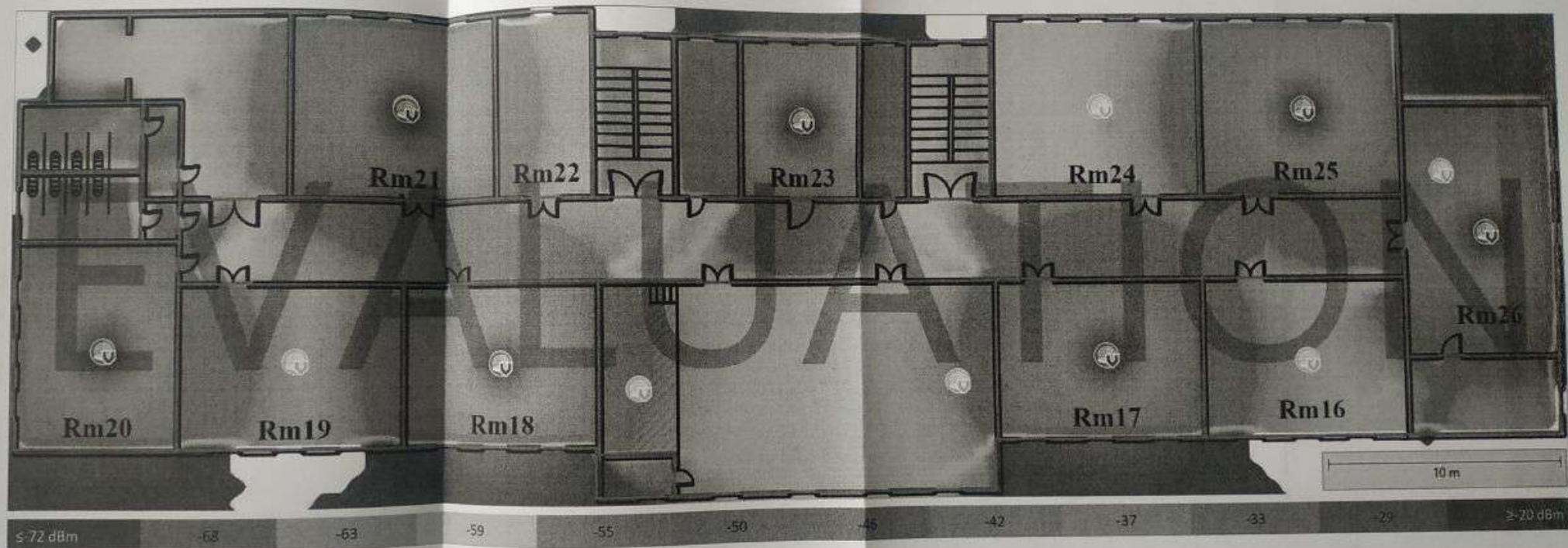
					13.02070849.00008 ПЛ1		
					Интерфейс пристрою		
					Вікно програми «WinBox» підключене до пристрою Mikrotik Har Ax3		
Зам.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Лист	Маса	Масштаб
Розроб.		Латишев А.В.					
Перев.		Киричук Г.Г.					
Т. конст.							
Н. конст.		Щербак Н.В.					
Затв.		Кулішівський Р.К.					
					Національний університет «Запорізька політехніка» КНТ-511м		



						13.02070849.00008 ПЛ2			
						Модель реалізації системи	Лист	Маса	Масив
Зам.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат.					
Розроб.		Латиненко А.В.							
Перев.		Киринчук Г.Г.					Лист	Листів	
Т.контр.							Національний університет «Запорізька політехніка» КНТ-511м		
Н.контр.		Шербаков Н.В.							
Зам.		Кулєрметов Р.К.							



13.02070849.00008 ПЛЗ				
Результати моделювання приміщення Рівень сигналу на першому поверсі в діапазоні 5 ГГц				
Зам.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.	Латиненко А.В.			
Перев.	Киричук Г.Г.			
Т.в.в.в.				
Н.в.в.	Шербаков Н.В.			
Зам.	Квасильський Р.К.			
Лист				
Листів				
Національний університет «Запорізька політехніка» КНТ-511м				



					13.02070849.00008 ПЛ4		
					Результати моделювання приміщення		
					Рівень сигналу на другому поверсі в діапазоні		
					5 ГГц		
Зам.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат.	Лист	Маса	Маса
Розроб.		Латинен А.В.					
Перев.		Киричук Г.Г.					
Тех.контр.							
Н.контр.		Шербак Н.Н.					
Дата		Куликов Р.К.					
					Національний університет «Запорізька політехніка» КНТ-511м		

